

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado



Análisis Tensional del Conjunto      Baqueta-  
Caja de una Batería Musical

Autor: Víctor Miguel Pérez Bella.

Tutor: Dr. Jorge López Puente.

Madrid, Junio 2016.



## Agradecimientos

El presente proyecto es fruto del esfuerzo de más de una persona. Para mí, esta es la última práctica de sacrificio y dedicación antes de ser ingeniero, por tanto, usaré este apartado de agradecimientos no solo pensando en este trabajo, sino también en todo el Grado en Ingeniería Mecánica que he cursado.

Primeramente, debo dar las gracias a mis padres. Ellos son sin duda, la principal causa de todo este camino. Ha sido su trabajo y esfuerzo el que ha hecho posible todos mis resultados, pues son ellos los primeros que confiaron en mí, dándome la posibilidad de estudiar lo que yo quisiese.

En este camino no podría faltar el agradecimiento a todos los buenos profesores que he conocido, que buscan la manera de mejorar sus actitudes docentes y que se esfuerzan por mejorar día a día las capacidades docentes de la Universidad Carlos III de Madrid.

También debo nombrar a mis amigos, como parte fundamental en este camino, sin ellos tampoco habría llegado tan lejos, dado que son ellos los que más coraje y fuerza me han transmitido al verles a mi lado sufriendo largas tardes de verano en la biblioteca y ayudándome en todo lo posible.

De forma más particular, acerca de este presente trabajo, debo nombrar al Doctor Jorge López Puente, mi tutor. Siempre ha aclarado mis dudas y se ha ofrecido a concertar una tutoría, además de proponer ideas fundamentales en este proyecto. Sinceramente creo que es uno de los mejores profesores que podría haber tenido como tutor y espero que siga impartiendo clase, dado que no solo como tutor, sino que como profesor, le tengo en muy alta estima. También debo nombrar de forma particular a Guillermo Bielsa López, dada su gran ayuda en este trabajo, sin él, no podría haber logrado acabar este proyecto.

## Resumen

*Este análisis tensional se centrará en las características sonoras de una caja, con el propósito de entender las diferentes variables que intervienen en el uso de este instrumento musical.*

*Primeramente necesitamos entender el suceso, cuántas variables intervienen y cómo intervienen en relación a la caja. Tenemos una baqueta golpeando el parche y dependiendo del material, geometría y la interacción entre la baqueta y la caja, el sonido producido será más o menos alto, definido, grave o agudo.*

*Usaremos un programa de ingeniería llamado Abaqus para simular el parche y el golpeo. Abaqus está basado en el Método de Elementos Finitos, usado en la industria aeroespacial y de automoción entre otras. Usaremos dos métodos diferentes para obtener información del mismo golpeo y así entender de forma completa lo que está sucediendo.*

*Del primer método, vamos a mostrar los modos de vibración del parche, las diferentes frecuencias con las que puede sonar la caja y cómo es la tensión que se produce en cada modo de frecuencia. Del segundo método vamos a reportar un diagrama espacio-temporal de un punto céntrico del parche. Seguidamente usaremos el programa Matlab para realizar la operación matemática llamada Transformada Rápida de Fourier (FFT) que convierte una señal espacio-temporal en una amplitud-frecuencia, llamado espectro de sonido. Este espectro de sonido nos dará la información del sonido de la caja.*

*Después de esto, contrastaremos los resultados obtenidos por los dos métodos para así tener una idea clara de lo que está sucediendo, y con el suceso simulado, cambiaremos los valores de las variables empleadas en el análisis para entender el efecto exacto de estas variables sobre el suceso simulado. Además, vamos a simular dos elementos usados por los percusionistas para producir un sonido más definido.*

*Este estudio pretende ser útil para los músicos, porque otorga ideas claras de la manera en que las variables contribuyen al sonido de la batería. Y también es interesante para las compañías fabricantes de baterías, porque podrían usar este análisis como herramienta para probar el sonido de nuevos parches fabricados con diferentes materiales, geometrías o complementos.*

## Resume

*This stress analysis will focus in the acoustic characteristics of the snare drum, in order to understand the different variables involved in the event of playing this instrument.*

*First of all we need to understand the event itself, how many variables are involved and how they work in relation with the snare drum. We have a stick hitting the snare head, and depending on the materials, geometry and the interaction between the stick and the snare head, the sound will be louder, sharper, bass or treble.*

*We will use an engineering software named Abaqus to simulate the snare head and the hit. Abaqus is based on the Finite Element Method, used in the aerospace and automation industry among others. We are going to use two different methods to obtain different information of the same event in order to understand the event completely.*

*From the first method, we are going to report the vibration modes of the snare head, the different frequencies that the snare drum could produce and how is the stress of the snare head in each frequency mode. From the second method we are going to report a space-time diagram of a centric point of the snare head. After that, we will use the software Matlab to make the mathematical operation called Fast Fourier Transform (FFT) that translates the space-time diagram into an amplitude-frequency diagram, called sound spectrum. This sound spectrum will give us all the information of the sound of the snare drum.*

*After this, we will contrast both methods in order to have a clear idea of the event, and once the simulators are ready, we are going to change the value of the used variables to understand what is the exact effect of these variables in the simulated event. Apart from that, we are going to simulate two different elements used by the musicians to produce a more defined sound.*

*This research is useful for musicians, as it gives clear ideas of the way the variables contribute to the sound of the whole drum set. It is also interesting for the big drum manufacturing companies, because they might use this method as an instrument to test the sound of new snare heads made with different materials, geometry or complements.*

# Índice:

1. Introducción y Objetivo del Proyecto.....	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Objetivo del Proyecto.....	11
2. Estado del Arte.....	13
2.1 Acústica.....	13
2.1.1 Introducción.....	13
2.1.2 Magnitudes características.....	13
2.1.3 Curvas isofónicas.....	17
2.1.4 Espectro acústico de la caja.....	19
2.2 Instrumentos de percusión.....	22
2.2.1 Introducción.....	22
2.2.2 Caja.....	23
2.2.3 Parche.....	25
2.2.4 Baquetas y golpeo.....	28
2.2.5 Elementos usados para variar el sonido de la caja.....	29
2.3 Método de Elementos Finitos .....	32
2.4 Transformada Rápida de Fourier.....	35
2.5 Estudios Similares.....	38
3. Modelización en Abaqus.....	44
3.1 Introducción.....	44
3.2 Parche.....	45
3.2.1 Propiedades y dimensiones del parche.....	45
3.2.2 Baqueta.....	48
3.2.3 Aro de presión.....	50
3.2.4 Mallado.....	52
3.3 Modelo del conjunto parche más aro.....	54

3.4	Modelo del conjunto parche más moongel.....	56
3.5	Métodos usados en Abaqus.....	57
3.5.1	Introducción.....	57
3.5.2	Método modos de vibración.....	58
3.5.3	Método pretensión y golpes.....	58
4.	Programa en Matlab.....	62
5.	Resumen de los datos iniciales.....	68
6.	Variaciones realizadas .....	69
7.	Resultados .....	73
7.1	Métodos usados en Abaqus .....	73
7.1.1	Introducción .....	73
7.1.2	Método modos de vibración .....	73
7.1.3	Método pretensión y golpes .....	77
7.1.4	Contrastación de los resultados .....	78
7.2	Variaciones realizadas .....	78
7.2.1	Introducción.....	78
7.2.2	Pretensión.....	79
7.2.3	Radio.....	84
7.2.4	Materiales.....	87
7.2.5	Zona de golpeo.....	88
7.2.6	Presión de golpeo.....	94
7.3	Modelo con aro.....	95
7.4	Modelo con moongel.....	96
8	Conclusiones y trabajo futuro.....	100
9	Bibliografía.....	103
10	Anexos.....	104
11	Índice de Imágenes.....	107

12 Índice de Tablas.....	109
13 Índice de Gráficas.....	110
14 Índice de Espectros de Sonido.....	111



# 1. Introducción y objetivo del proyecto

## 1.1 Introducción

Como alumno de grado en Ingeniería Mecánica de la universidad Carlos III de Madrid finalizaré mi formación académica realizando el presente proyecto. Este trabajo consigue aunar mi pasión y mi vocación. Pocas veces se me ha presentado la opción de elegir el qué y el cómo estudiar mi ingeniería. En esta ocasión aproveché para buscar la manera de estudiar la música desde las herramientas que se me han otorgado en la universidad.

Lo primero que hay que entender es que la música son ondas que llegan a los oídos, y todos los instrumentos podrían ser estudiados hasta entender la forma de generación de esas ondas. En especial, los instrumentos de cuerda y de percusión pueden verse sometidos más fácilmente a análisis tensionales, en los que se podrían estudiar los materiales, herrajes y mecanismos que hacen posible que el sonido sea de una manera determinada. La intención es hacer un análisis de algo sencillo y entendible, pero elemental; y si nos fijamos en el simple golpeo de un palo de madera en una caja circular con una membrana de tapa nos damos cuenta que es un sistema muy sencillo. El conjunto baqueta-caja. Este sonido es fundamental para la música, y es muy atractivo estudiar su interacción.

La posibilidad de parametrizar y matematizar este conjunto resulta muy seductora, dadas las relaciones que podrían hacerse entre las propiedades del material y el golpeo, con el sonido final que se genera.

Para este estudio se ha usado el método de elementos finitos por medio del programa Abaqus. Este método consiste en discretizar un sistema continuo en elementos interconectados, especificar el comportamiento de cada elemento mediante un conjunto finito de parámetros, ensamblar dichos elementos y resolver el sistema complejo. [1] En nuestro caso, el sistema continuo que hay que discretizar es el parche de la caja, es decir, la membrana circular donde se golpea con la baqueta. Para discretizarlo se divide en diferentes elementos unidos entre sí por nodos. Para especificar el comportamiento de cada elemento, se aplica a todos ellos las propiedades del material del parche, que en

nuestro caso es un material compuesta llamado Mylar. A ciertos elementos en cuestión también se les aplicará una presión que simule el golpeo de la baqueta.

El software en cuestión, Abaqus, es un programa usado por multitud de empresas para resolver estructuras y sólidos. Usamos este programa principalmente porque es el que hemos aprendido en diferentes asignaturas a lo largo del grado, y por los acuerdos que tiene la Universidad Carlos III para poder usarlo, dado que las licencias de este tipo de programas tienen un coste elevado. Estos programas son tan usados por toda la información que otorga, lo que ahorra realizar numerosas pruebas y ensayos con prototipos.

Una vez se tenga simulado el parche con sus propiedades y su golpeo de la baqueta, los resultados que nos ofrece Abaqus son muy amplios, sin embargo, no es un programa de sonido que nos vaya a dar el sonido de esa caja con esas propiedades. Se desea obtener de él los modos de vibración del parche. Dichos modos de vibración están directamente relacionados con el sonido que se va a generar, y se representan en la curva del sonido, en la gráfica llamada espectro de sonido. Cada sonido tiene una onda o curva de sonido determinada dentro del espectro. Este espectro es una gráfica amplitud-tiempo que abarca la capacidad del oído humano de percibir el sonido. Y la onda que genera nuestro parche, que aparece en el espectro, representa la vibración, es decir, el sonido que produce el parche, donde la amplitud hace referencia al volumen del sonido, y la frecuencia a lo grave o agudo que es ese sonido.

Además, Abaqus también da la posibilidad de estudiar el comportamiento de uno de los elementos, es decir, de un “trozo” del parche. Esto resulta muy útil, pues se puede obtener el desplazamiento para un elemento, dentro de una gráfica o tabla espacio-temporal, que después podemos convertir en una gráfica amplitud-tiempo de onda. Dicha gráfica no deja de ser el espectro de sonido. Para la conversión de la ecuación espacio-temporal a amplitud-tiempo, usaremos una Transformada de Fourier (Fast Fourier Transform) o FFT.

De tal forma que hay dos formas de obtener el sonido que se va a generar. Al tener estos métodos, se puede otorgar al estudio una gran robustez, dado que lo resolveremos de dos maneras, para comprobar que de ambas formas se obtienen los mismos resultados, es decir, la misma onda en el espectro del sonido.

## 1.2 Objetivo

El objetivo de este proyecto es parametrizar la generación del sonido en el golpeo de una baqueta sobre una caja. Conseguir una relación directa entre las propiedades del parche y las del sonido. Con esto se pretende identificar las variables que afectan al sonido, y como varía el sonido a medida que varían estas variables. Es decir, abrir la posibilidad a saber cómo va a sonar el parche antes de haberlo fabricado.

Esto es muy interesante para el mundo del sonido y la música. En una obra musical, desde clásicas hasta contemporáneas, se trabaja con el espectro de sonido. Es decir, la gráfica amplitud-tiempo que abarca la capacidad del oído humano de percibir sonido. Hoy día, a la hora de mezclar los instrumentos musicales, se usa este espectro de sonido para ver la curva del sonido de una pieza musical. Así se sabe exactamente qué frecuencias están cubiertas y qué frecuencias están por encima de otras. Si, por ejemplo, en una canción no se usan instrumentos graves, como un bombo, un contrabajo o un trombón; las frecuencias bajas de la curva de sonido de esa canción apenas tendrán amplitud y a nivel sensorial se diría que la canción no tiene cuerpo o que no envuelve.

En el caso del parche, al ser un instrumento más bien agudo, se espera conseguir una curva de sonido visible en frecuencias altas, que son las frecuencias agudas. Y ver como varía ese sonido a medida que se aumenta o disminuye el espesor del parche, o a medida que se tense o se destense. Este análisis también tendrá en cuenta las propiedades del material del que está hecho el parche, por tanto, también se puede comparar la curva de sonido que genera un parche de un material o de otro.

A la hora de configurar el sonido de una batería, podrían realizarse este tipo de análisis, desde el mismo momento de la fabricación de los elementos, para conseguir un sonido determinado. Al igual que se podría usar este análisis para estudiar el comportamiento de diferentes elementos que se puedan colocar sobre el parche.

Podríamos resumir los objetivos del presente proyecto en los siguientes puntos:

- Simular el golpeo baqueta caja de una batería
- Conseguir los modos de vibración y con ello la curva de sonido que genera el parche en cuestión

- Usar dos métodos de resolución para corroborar la solución.
- Identificar las variables de las que depende la curva de sonido
- Entender la relación que existe entre la curva de sonido y las variables de las que depende el parche
- Servir como herramienta para probar la utilidad de ciertas modificaciones o elementos que se puedan aplicar al parche.

## 2. Estado del Arte

### 2.1 Acústica

#### 2.1.1 Introducción

En esta parte del estado del arte se intenta explicar el sonido más detenidamente, para que se comprendan lo mejor posible los conceptos de espectro, onda, y en general, todo lo relacionado con el sonido. Para este apartado del estado de arte emplearé lo aprendido en la asignatura de Diseño Industrial, en especial en el tema de Acústica Industrial.

Se deben diferenciar tres elementos fundamentales en el sonido:

Elemento generado: Cuerpo material que realiza un movimiento vibratorio, en el presente trabajo sería el parche de la caja.

Elemento transmisor: Medio por el que se propagan las ondas, en nuestro sistema, estaríamos hablando del aire.

Elemento receptor: En su ausencia, sólo habría movimiento vibratorio y las ondas que éste produzca, pero no se hablaría de sonido. En nuestro caso sería el oído humano, o si pusiésemos un afinador cerca del parche, este dispositivo sería el elemento receptor.

También hay que comprender que el sonido y las vibraciones son dos manifestaciones del mismo fenómeno físico. Ambos consisten en la propagación de una fluctuación mecánica a través de un medio elástico. La diferencia se encuentra en la naturaleza de la fluctuación y en el medio elástico a través del cual se transmiten. La vibración es una onda de desplazamiento mecánico que se transmite a través de un sólido, mientras que el sonido es una onda de presión que se transmite a través del aire. [2]

#### 2.1.2 Magnitudes características

Las magnitudes características de las que depende el sonido son las siguientes [2]:

- Frecuencia y Periodo:

El periodo “T” es el tiempo en segundos que tarda en pasar la onda por la misma posición de amplitud. La frecuencia es el inverso del periodo de la onda  $f = 1 / T$ . La frecuencia se mide en ciclos por segundo o “Hercios” (HZ). Las frecuencias bajas se corresponden con tonos graves y las frecuencias altas con tonos agudos. Así, como la caja es un instrumento principalmente agudo (al revés

que el bombo) la frecuencia de su onda debería ser alta. Para hacernos una idea de las frecuencias que oímos, se muestra la siguiente imagen:

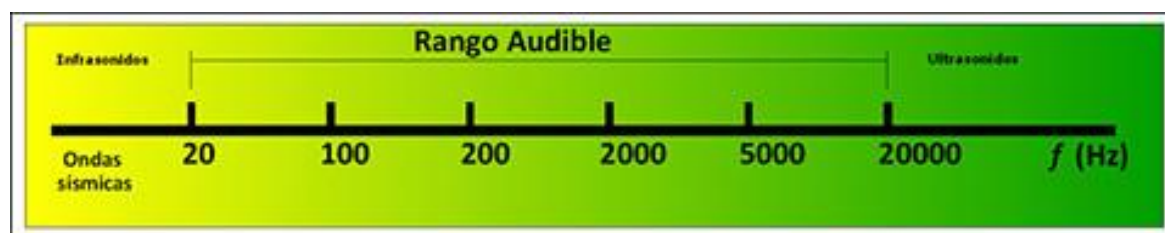


Imagen 1: Rango audible

A continuación se presenta una relación entre las 88 notas de un piano estándar, con las notas en dos cifrados diferentes y la frecuencia que tiene cada nota:

Número de tecla	Notación franco-belga	Notación anglosajona	Frecuencia (Hz)		Número de tecla	Notación franco-belga	Notación anglosajona	Frecuencia (Hz)
88	do <sub>7</sub>	C8	4186,01		44	mi <sub>3</sub>	E4	329,628
87	si <sub>6</sub>	B7	3951,07		43	re <sub>3</sub> /mi <sub>b3</sub>	D#4/Eb4	311,127
86	la <sub>6</sub> /si <sub>b6</sub>	A#7/Bb7	3729,31		42	re <sub>3</sub>	D4	293,665
85	la <sub>6</sub>	A7	3520		41	do <sub>3</sub> /re <sub>b3</sub>	C#4/Db4	277,183
84	sol <sub>6</sub> /la <sub>b6</sub>	G#7/Ab7	3322,44		40	do <sub>3</sub>	C4 (do central)	261,626
83	sol <sub>6</sub>	G7	3135,96		39	si <sub>2</sub>	B3	246,942
82	fa <sub>6</sub> /sol <sub>b6</sub>	F#7/Gb7	2959,96		38	la <sub>2</sub> /si <sub>b2</sub>	A#3/Bb3	233,082
81	fa <sub>6</sub>	F7	2793,83		37	la <sub>2</sub>	A3	220
80	mi <sub>6</sub>	E7	2637,02		36	sol <sub>2</sub> /la <sub>b2</sub>	G#3/Ab3	207,652
79	re <sub>6</sub> /mi <sub>b6</sub>	D#7/Eb7	2489,02		35	sol <sub>2</sub>	G3	195,998
78	re <sub>6</sub>	D7	2349,32		34	fa <sub>2</sub> /sol <sub>b2</sub>	F#3/Gb3	184,997
77	do <sub>6</sub> /re <sub>b6</sub>	C#7/Db7	2217,46		33	fa <sub>2</sub>	F3	174,614
76	do <sub>6</sub>	C7	2093		32	mi <sub>2</sub>	E3	164,814
75	si <sub>5</sub>	B6	1975,53		31	re <sub>2</sub> /mi <sub>b2</sub>	D#3/Eb3	155,563
74	la <sub>5</sub> /si <sub>b5</sub>	A#6/Bb6	1864,66		30	re <sub>2</sub>	D3	146,832
73	la <sub>5</sub>	A6	1760		29	do <sub>2</sub> /re <sub>b2</sub>	C#3/Db3	138,591
72	sol <sub>5</sub> /la <sub>b5</sub>	G#6/Ab6	1661,22		28	do <sub>2</sub>	C3	130,813
71	sol <sub>5</sub>	G6	1567,98		27	si <sub>1</sub>	B2	123,471
70	fa <sub>5</sub> /sol <sub>b5</sub>	F#6/Gb6	1479,98		26	la <sub>1</sub> /si <sub>b1</sub>	A#2/Bb2	116,541
69	fa <sub>5</sub>	F6	1396,91		25	la <sub>1</sub>	A2	110
68	mi <sub>5</sub>	E6	1318,51		24	sol <sub>1</sub> /la <sub>b1</sub>	G#2/Ab2	103,826

67	re <sub>5</sub> /mi <sub>b</sub> <sub>5</sub>	D#6/E <sub>b</sub> 6	1244,51		23	sol <sub>1</sub>	G2	97,9989
66	re <sub>5</sub>	D6	1174,66		22	fa <sub>1</sub> /sol <sub>b</sub> <sub>1</sub>	F#2/G <sub>b</sub> 2	92,4986
65	do <sub>5</sub> /re <sub>b</sub> <sub>5</sub>	C#6/D <sub>b</sub> 6	1108,73		21	fa <sub>1</sub>	F2	87,3071
64	do <sub>5</sub>	C6	1046,5		20	mi <sub>1</sub>	E2	82,4069
63	si <sub>4</sub>	B5	987,767		19	re <sub>1</sub> /mi <sub>b</sub> <sub>1</sub>	D#2/E <sub>b</sub> 2	77,7817
62	la <sub>4</sub> /si <sub>b</sub> <sub>4</sub>	A#5/B <sub>b</sub> 5	932,328		18	re <sub>1</sub>	D2	73,4162
61	la <sub>4</sub>	A5	880		17	do <sub>1</sub> /re <sub>b</sub> <sub>1</sub>	C#2/D <sub>b</sub> 2	69,2957
60	sol <sub>4</sub> /la <sub>b</sub> <sub>4</sub>	G#5/A <sub>b</sub> 5	830,609		16	do <sub>1</sub>	C2	65,4064
59	sol <sub>4</sub>	G5	783,991		15	si <sub>0</sub>	B1	61,7354
58	fa <sub>4</sub> /sol <sub>b</sub> <sub>4</sub>	F#5/G <sub>b</sub> 5	739,989		14	la <sub>0</sub> /si <sub>b</sub> <sub>0</sub>	A#1/B <sub>b</sub> 1	58,2705
57	fa <sub>4</sub>	F5	698,456		13	la <sub>0</sub>	A1	55
56	mi <sub>4</sub>	E5	659,255		12	sol <sub>0</sub> /la <sub>b</sub> <sub>0</sub>	G#1/A <sub>b</sub> 1	51,913
55	re <sub>4</sub> /mi <sub>b</sub> <sub>4</sub>	D#5/E <sub>b</sub> 5	622,254		11	sol <sub>0</sub>	G1	48,9995
54	re <sub>4</sub>	D5	587,33		10	fa <sub>0</sub> /sol <sub>b</sub> <sub>0</sub>	F#1/G <sub>b</sub> 1	46,2493
53	do <sub>4</sub> /re <sub>b</sub> <sub>4</sub>	C#5/D <sub>b</sub> 5	554,365		9	fa <sub>0</sub>	F1	43,6536
52	do <sub>4</sub>	C5	523,251		8	mi <sub>0</sub>	E1	41,2035
51	si <sub>3</sub>	B4	493,883		7	re <sub>0</sub> /mi <sub>b</sub> <sub>0</sub>	D#1/E <sub>b</sub> 1	38,8909
50	la <sub>3</sub> /si <sub>b</sub> <sub>3</sub>	A#4/B <sub>b</sub> 4	466,164		6	re <sub>0</sub>	D1	36,7081
49	la <sub>3</sub>	A4 (la 440)	440		5	do <sub>0</sub> /re <sub>b</sub> <sub>0</sub>	C#1/D <sub>b</sub> 1	34,6479
48	sol <sub>3</sub> /la <sub>b</sub> <sub>3</sub>	G#4/A <sub>b</sub> 4	415,305		4	do <sub>0</sub>	C1	32,7032
47	sol <sub>3</sub>	G4	391,995		3	si <sub>-1</sub>	B0	30,8677
46	fa <sub>3</sub> /sol <sub>b</sub> <sub>3</sub>	F#4/G <sub>b</sub> 4	369,994		2	la <sub>-1</sub> /si <sub>b</sub> <sub>-1</sub>	A#0/B <sub>b</sub> 0	29,1353
45	fa <sub>3</sub>	F4	349,228		1	la <sub>-1</sub>	A0	27,5

Tabla 1: Relación entre las frecuencias y las notas del piano

- Amplitud:

Al aplicar una presión sinusoidal a las partículas de aire, es decir, la presión que generan las vibraciones, estas partículas de aire se comprimen y se expanden alternadamente, lo que se refleja en pequeñas variaciones de la presión atmosférica.

La amplitud hace referencia al Nivel de Presión sonora y se mide en decibelios. El oído humano se comporta de forma logarítmica y por lo tanto se debe utilizar una escala logarítmica para medir la amplitud del sonido. Hoy en día, los decibelios a los que se escucha la música que se reproduce en un dispositivo de reproducción de música, se varían por medio de lo que llamamos “volumen”. Nuestra caja, sin embargo, al sonar al natural, es decir,

no a través de un dispositivo, podrá variar en función una de las variables del sistema. Es bastante intuitivo pensar que cuanto más fuerte se le golpee a la caja, más alto sonará, mientras que si se le da flojo, apenas se percibirá el sonido.

En la siguiente imagen se muestra una tabla de ejemplos de fuentes de sonido con la amplitud que tiene, medida no solo en decibelios, sino en intensidad y en pascales de presión:

p (Pa)	I(w/m <sup>2</sup> )	L(dB)	Fuente
63.2	10	130	Umbral de dolor
20	1	120	Despegue avión
6.32	0.1	110	Máquina de remachado
2	0.01	100	Martillo neumático
0.632	0.001	90	Camión diesel a 15m
0.2	0.0001	80	Grito (a 1m)
0.0632	0.00001	70	Oficina ocupada
0.02	0.000001	60	Conversación normal a 1m
0.00632	0.0000001	50	Area urbana tranquila (día)
0.002	0.00000001	40	Area urbana tranquila (noche)
0.000632	0.000000001	30	Area suburbana tranquila (noche)
0.0002	0.0000000001	20	Campo tranquilo
0.0000632	0.00000000001	10	Susurro humano
0.00002	0.000000000001	0	Umbral de audición

*Tabla 2: Relación de dB con Pa, su intensidad y fuente de diferentes sonidos*

Forma de onda o timbre:

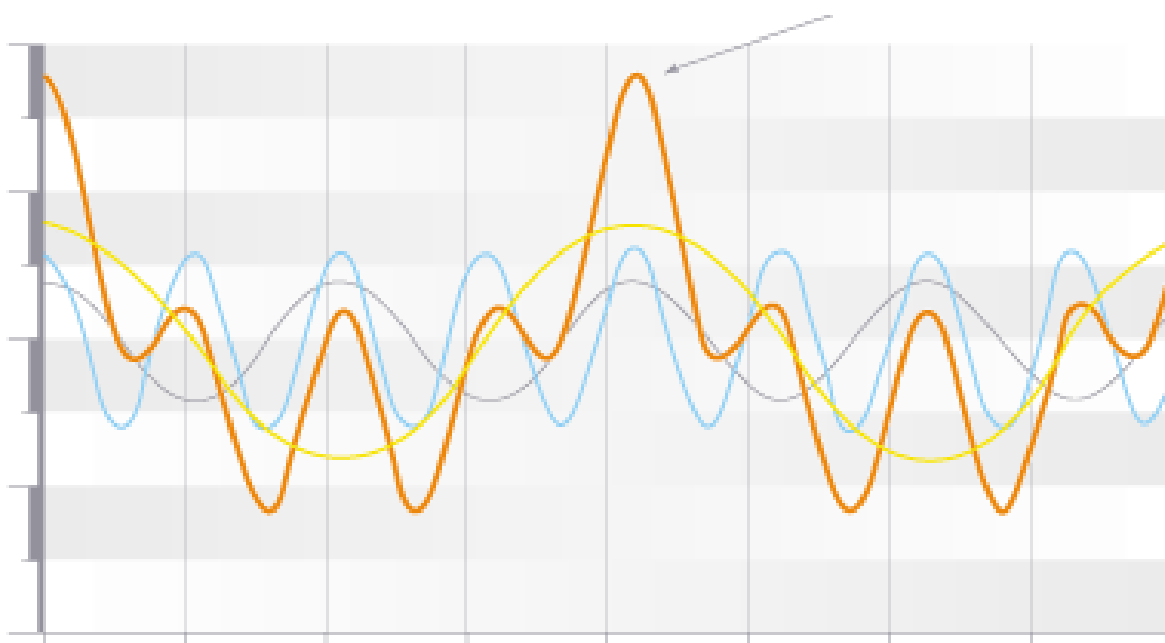
Es la cualidad de la onda que permite reconocer la fuente del sonido, independientemente de su frecuencia e intensidad. El timbre se debe a que las ondas sonoras no son tonos puros, sino una suma de armónicos superpuestos que acompañan a la frecuencia fundamental. El armónico de una onda es un componente sinusoidal de una señal. Su frecuencia es un múltiplo de la fundamental.

Por ejemplo, si dos instrumentos diferentes ejecutaran la nota do<sup>3</sup> (musicalmente hablando sería do cinco), la onda fundamental de ambos poseería la misma frecuencia (en este ejemplo 264 Hz o ciclos por segundo). Sus timbres son diferentes porque cada uno produce unos armónicos diferentes, con amplitudes también diferentes. [3]



La amplitud de los armónicos más altos es mucho menor que la amplitud de la onda fundamental y tiende a cero; por este motivo los armónicos por encima del quinto o sexto generalmente son inaudibles. [4]

En la siguiente imagen se muestra una gráfica amplitud-tiempo. En ella se puede apreciar la onda fundamental pintada en color naranja. Además se distinguen tres armónicos. Siguiendo la regla de la amplitud de los armónicos, podemos deducir que el primer armónico está representado por la onda dibujada en amarillo, mientras que el segundo y tercer armónico corresponden a las ondas azul y gris respectivamente.



*Imagen 2: Ondas sonoras de una frecuencia fundamental y sus armónicos sobre el dominio del tiempo*

### 2.1.3 Curvas Isofónicas

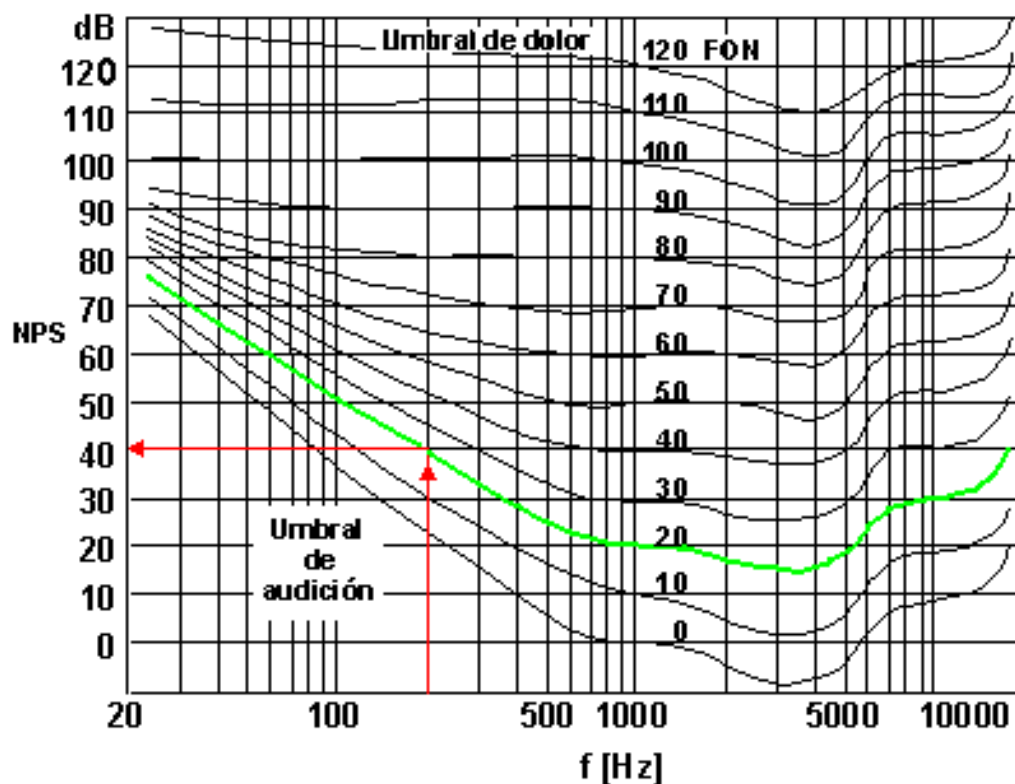
Como ya se ha dicho anteriormente, el ser humano es capaz de detectar únicamente aquellos sonidos que se encuentren dentro de un determinado rango de amplitudes y frecuencias. Es decir, nuestro oído es capaz de percibir un sonido por encima de un nivel de volumen determinado (amplitud, presión sonora) y por debajo de otro nivel de volumen, a partir del cual nos causaría daños en el oído.

De la misma manera, el oído es capaz de percibir sonidos a partir de una frecuencia de graves y hasta una frecuencia de agudo. Es sabido, que los perros son capaces de oír sonidos más agudos que los que podría oír un humano, esto es porque su rango audible, su límite superior de capacidad auditiva es más elevado al nuestro, por

ello son capaces de escuchar sonidos más agudos. Para una persona joven y en condiciones normales, este rango de frecuencias abarca desde los 20Hz hasta los 20kHz. Este rango varía de un sujeto a otro, disminuye en función de la edad del sujeto y de los factores ambientales.

Sin embargo, la sensibilidad del oído depende de la frecuencia. Es decir, nuestro oído no tiene una misma sensibilidad para los sonidos agudos y graves. Para representar la sensibilidad del oído se establecieron unas curvas dentro de una gráfica Amplitud-Frecuencia, que definen la sonoridad que percibimos en función de la frecuencia. Se estableció el Fonio (FON) como unidad de medida que simulaba una misma percepción de intensidad por parte de nuestros oídos. Es decir, a lo largo de una de estas curvas los sonidos nos parecen igualmente intensos, aunque las intensidades reales medidas en dB sean diferentes. Dicho de otra manera, un nivel de presión sonora determinado nos parecerá que está a más volumen si la frecuencia que tiene la onda es aguda.

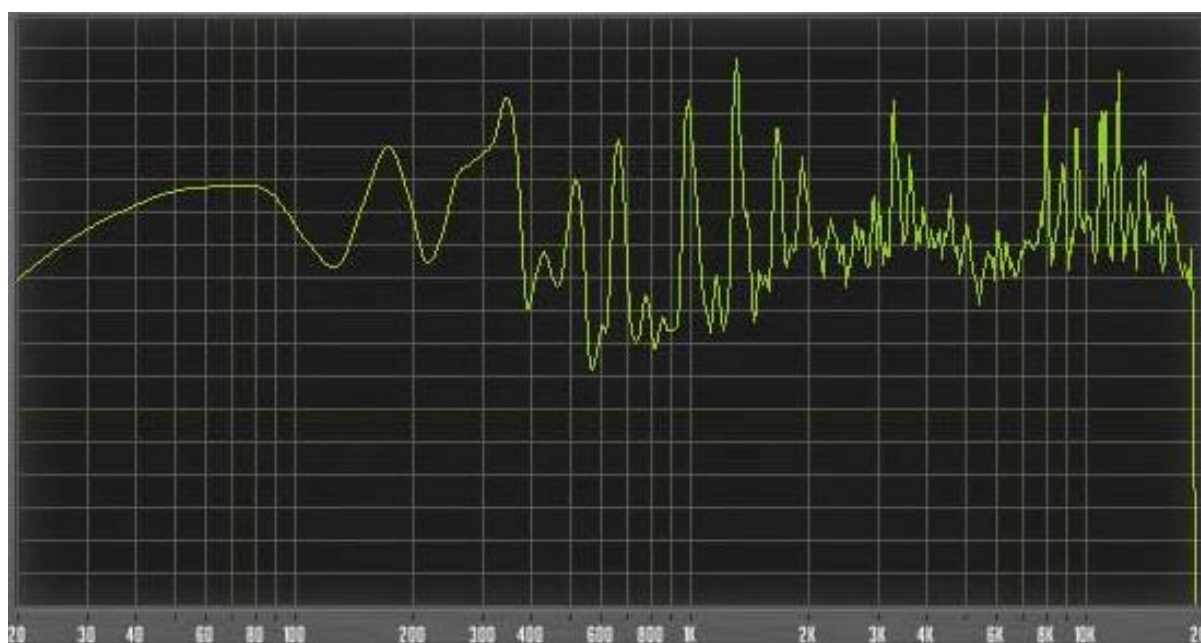
En la imagen se muestran las curvas, cada una con su nivel de Fonios determinados. Se puede apreciar, que nuestro oído es más sensible entre frecuencias de 1.000 Hz y 5.000Hz, que es la frecuencia que suele tener la voz humana. Es evidente pensar que nuestro oído se ha “especializado” en escuchar esas frecuencias. Gracias a estas curvas se entiende que los instrumentos graves de las canciones se perciban menos que los agudos. Esto es porque en el estudio de grabación, cuando se está creando una pieza musical, el nivel de presión sonora al que se suele mezclar los instrumentos tiende a ser elevada, dicho de otro modo, en el estudio se trabaja a mucho volumen. Así, cuando se finaliza de escoger los niveles de dB de cada uno de los instrumentos y se escucha el tema a un volumen alto, se escuchan todos los instrumentos equilibrados y a gusto de los artistas. Sin embargo, cuando ese mismo tema se baja de volumen, dadas las curvas isofónicas, se perciben menos los instrumentos graves como el bajo eléctrico, el trombón o el bombo; sin dejar de escuchar las frecuencias de guitarras, violines y voces al nivel de volumen que lo pongamos en nuestro reproductor.



Gráfica 1: Curvas isofónicas

### 2.1.4 Espectro acústico

Como ya he explicado anteriormente, el espectro acústico o audible es una gráfica de amplitud-frecuencia con un ancho de banda igual a la capacidad que tiene el oído humano de percibir las frecuencias. Esto es, como se muestra en la imagen, un eje X de frecuencia desde 20 Hz hasta 20.000Hz. En el eje Y se muestra la amplitud de cada una de las frecuencias.

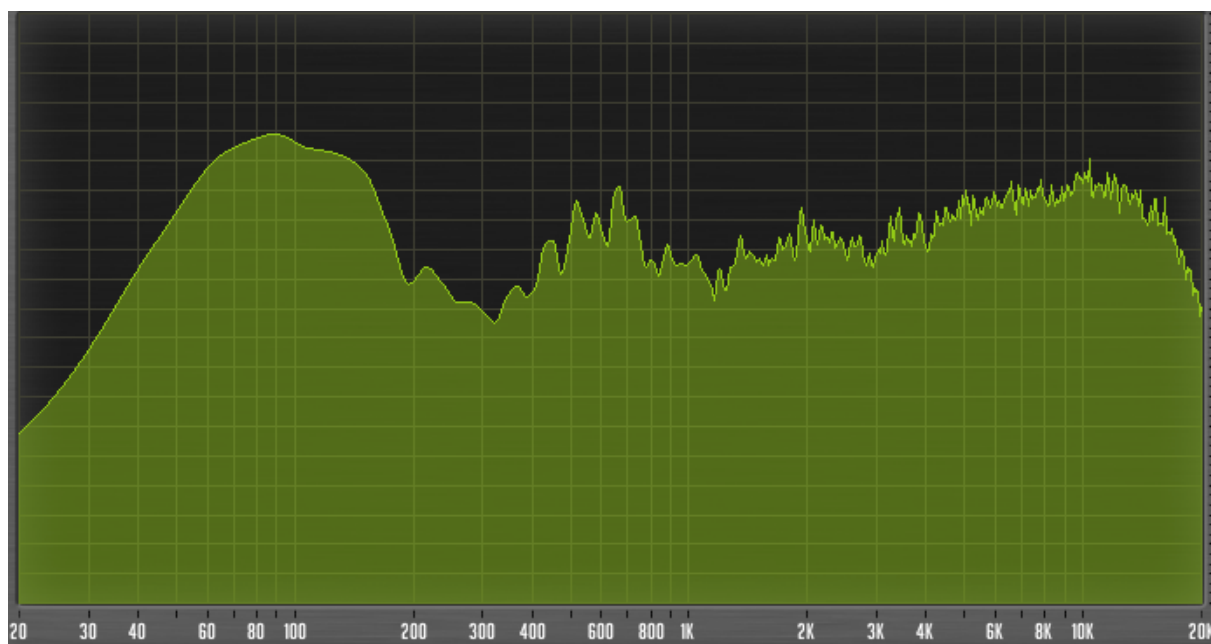


*Espectro de sonido 1: Ejemplo de onda de una canción sin cuerpo*

Esta gráfica en particular muestra una curva real de un momento determinado de una canción. En ella se puede ver cómo las frecuencias graves, entre los 20 y los 100 Hz están equilibradas y “redondeadas” mientras que a medida que vamos hacia frecuencias más graves aparecen más picos y valles. En una producción musical profesional se trabaja con este espectro constantemente. Dicho de otra manera, a la hora de grabar en estudio, se tiene casi siempre abierta la ventana en la que se muestra este espectro para ver qué frecuencias están cubiertas y cuáles no. Lo que se busca en la música es que todas las frecuencias estén cubiertas y equilibradas. Esto le da al sonido una amplitud y un cuerpo que resultan muy agradables al oído.

Es muy típico encontrar en nuestros reproductores de música una opción que sea la EQ, o ecualizador. Esta opción nos ayuda a resaltar o disminuir la amplitud de ciertas frecuencias en nuestro reproductor. Así, si nos gusta escuchar más graves de lo normal, gracias al ecualizador podremos realzar las frecuencias bajas para así conseguir un sonido más grave de la canción en cuestión. También, si creemos que la voz se oye demasiado alto o bajo, podremos ir a las frecuencias agudas en las que se encuentra la voz y aumentarlas o disminuirlas al gusto para conseguir el sonido deseado.

Es necesario entender este apartado y la importancia que tiene este espectro audible para poder entender las posibles aplicaciones del presente trabajo. En la anterior imagen del espectro, podemos ver cómo la frecuencia inmediatamente consecuente a 200Hz (entre 200-250 Hz) está muy baja. Si consiguiésemos tener esas frecuencias cubiertas en ese momento de la canción, el sonido sería más agradable, profesional y cautivador. Se podría hacer el mismo análisis con todos los valles que tiene. Sin embargo, tampoco quedaría natural una recta en el espectro, es decir, se necesita dinamismo para aportar naturalidad. En la siguiente imagen se muestra una onda mucho más equilibrada. Este espectro sería el resultado de una buena producción musical. A pesar de que quizás tenga demasiados graves y pocos medios graves, y pudiésemos hacer el mismo análisis alrededor de los 200Hz, esta onda daría una sensación mucho mejor que la anterior.



*Espectro de sonido 2: Ejemplo de onda de una canción con cuerpo*

Cabe destacar que al tratarse de música, la subjetividad del gusto artístico de cada persona aporta una libertad a la hora de tratar el sonido con el ecualizador. Así, esta imagen anterior quizás sea perfecta para ese momento concreto de la canción para el técnico de sonido que la ha tratado, sin embargo, para otro técnico le podría resultar un tanto excesivo el realce de graves.

Por último quería mencionar la importancia de la naturalidad en la música. Hoy en día existen numerosos programas informáticos usados no solo para producir, sino también para crear música. Sin embargo, se sigue grabando con micrófonos que recogen el sonido de uno u otro instrumento. Esto es porque lo que nos transmite, lo que nos llega y nos llena debe ser natural. Hay numerosos ejemplos de artistas que no realizan obras perfectas en afinación o estructura rítmica, ni lo intentan, como pueda ser Bob Dylan o Joaquín Sabina. Pero consiguen llegar a la gente por su naturalidad. Así se pueden explicar géneros enteros como el Grunge de Nirvana o el Punk de los Sex Pistols. Por ello, en un mundo cada vez más informatizado, sigue teniendo sentido que las grabaciones sigan haciéndose así. Y a pesar de poder variar el sonido del golpeo en un parche por medio de ecualizadores o programas de grabación, siempre se intenta sacar un sonido del parche que suene bien en crudo, sin tratar, al natural, pues al final es lo que nos transmite y nos llena.

## 2.2 Instrumentos de percusión

### 2.2.1 Introducción

Dentro de los instrumentos de percusión se diferencian dos grandes grupo:

- De entonación definida: Si su sonido produce sensación de tono, de dar una nota en definida, como es el caso de los timbales, las campanas, los xilófonos...
- De entonación indefinida: Si producen sonidos difícilmente entendibles dentro del rango tonal, es decir, que no sea intuitivo afirmar que está dando una nota u otra. Dentro de este grupo entran el bombo, los platillos y nuestra caja.

Existe también otra diferenciación, basada en la estructura del instrumento, así podemos distinguir entre los instrumentos de placas (platillos, gongs, crótalos...) instrumentos de varillas (xilófono) e instrumentos de membrana (timbales, bombos, caja). Este trabajo se centra en el parche de una caja, sin embargo, al compartir una estructura similar con los timbales y el bombo, una estructura basada en un parche tensado, el presente trabajo podrá sacar conclusiones y datos de toda esta categoría. A la hora de mostrar los parámetros sobre los que se ha basado el análisis, se entenderá que el parche que entra dentro de estudio, podría ser perfectamente el de un timbal o un bombo.

En cuanto a la diferenciación de la entonación, cabe destacar el hecho de que, a pesar de no entender la nota de una caja o un bombo tan fácilmente como la entendemos de un piano o una guitarra, el sonido que produce sigue siendo una onda, con una frecuencia fundamental y unos armónicos, y una amplitud determinadas. Así, aunque no podamos experimentar un Do o un Re tan fácilmente como lo experimentamos al escuchar un piano, sí que se está produciendo una nota.

Como ya dijimos anteriormente, en cualquier grabación profesional que escuchamos, esto se tiene en cuenta, así se buscan frecuencias que proporcionen las cajas, los timbales o los bombos, que empasten con el resto de instrumentos y que hagan del sonido de la canción un sonido más abierto y completo.

En cualquier grabación se tienen diferentes cajas, pensando el sonido que te da cada una. Es decir, a la hora de crear una pieza musical y llevarla a su máximo esplendor, se buscan unas frecuencias determinadas.

Este trabajo intenta, no solo entender mejor las variables de las que dependen estas frecuencias, sino dar el conocimiento de cómo variar esas variables para conseguir las frecuencias deseadas.

En la siguiente parte del estado del arte expondré claramente qué es una caja y qué es un parche. También hablaré acerca de su curva de sonido en relación a la afinación y al uso real de esta curva hoy día. Comprender el uso de la caja en la música actual me parece importante para adquirir un conocimiento global del análisis, pensando en la mejor captación de los conceptos que rodean este análisis. Debo recordar que aunque el análisis sea por software, uno de los objetivos del presente trabajo es entender la relación que existe entre la curva de sonido y las variables y características de las que depende un parche real. Esta introducción a los instrumentos de percusión servirá para saber cuáles son esas variables, y cómo se influye sobre ellas.

## 2.2.2 Caja

La caja es, probablemente, el instrumento más personal entre los que componen la batería. Éste elemento resulta particularmente importante ya que está presente en la mayoría de los patrones, ritmos y arreglos que se escuchan en la percusión de la música moderna. No es extraño encontrar músicos que poseen varias cajas con el fin de amoldarse a los diferentes contextos musicales a los que se enfrentan. Esto se traduce, en tener diferentes sonidos para diferentes canciones, buscando unas frecuencias determinadas para cada pieza musical. También es muy usual que en las grabaciones de estudio se tenga preparado un buen arsenal de cajas para probar timbres y sonoridades distintos. Con esto se consigue dar un color diferente a la sonoridad general de la batería y, por ende, a la canción. [5]

Una caja es un tambor, usualmente de poca altura. El instrumento está compuesto por:

- Un cilindro recto llamado casco. Puede ser de madera, metal, etc. Cada madera proporciona un timbre distinto a la caja, siendo las maderas de arce y abedul las más utilizadas. Respecto al metal, los más empleados son el latón, el bronce y el acero.



- Una bordonera, que son unos hilos de metal llamados bordones dispuestos diametralmente en la membrana inferior, como se muestra en la imagen. La bordonera le proporcionan a la caja su característico timbre y brillo más estridente y metálico que el del tambor común. Las cajas tienen un mecanismo por el cual se le puede desacoplar la bordonera. Esto se usa para ciertos momentos de ciertas canciones en los que se busca un sonido determinado. En particular, puede ser muy útil para puentes o solos de batería.



*Imagen 3: Bordonera de una caja*

- Las bases del casco son dos membranas llamadas parches.

En las cajas usadas para orquesta o batería las medidas más usuales del casco son 14" de diámetro y 6" de profundidad. También pueden utilizarse cajas auxiliares de otros diámetros o altura, destacando por ejemplo las denominadas piccolo, con un diámetro convencional (14", 13") pero poca profundidad (3", 3,5"). Asimismo, las cajas soprano constan de profundidad convencional (5", 7") pero diámetro pequeño (10", 12"). Por otra parte, es usual que en las cajas usadas para la marcha se utilicen alturas mayores, para así poder conseguir un sonido más profundo y potente, necesario para el uso exterior. [5]

Hoy en día, dentro del espectro de sonido, la caja tiene dos frecuencias fundamentales. Por un lado, la del parche, que es la más importante dado que es la que aporta más ritmo, esta frecuencia ronda los 200 Hz, siendo una frecuencia media tirando a grave. Por otro lado, la frecuencia que le otorga la bordonera, que es la que le aporta ese brillo metálico a la caja, y está en torno a los 5000 Hz. Dicha frecuencia es claramente aguda, dado que proviene de hilos de metal, por ello está próxima a la frecuencia de los platos.



### 2.2.3 Parche

Un parche es una membrana tensada sobre uno o ambos extremos abiertos de un tambor. Originalmente los parches eran confeccionados con cuero de vacuno, pero era muy difícil mantenerlos afinados, así como muy pobre su resistencia a los efectos climáticos (humedad y temperatura).

En 1956, Chick Evans inventó el parche de plástico, recurriendo a un derivado del poliéster llamado Mylar, creado por DuPont. Las ventajas del parche de plástico fueron evidentes desde un principio: menor costo, tonalidad relativamente estable, menores efectos ambientales y mayor durabilidad.

Luego de la aparición del Mylar, DuPont produjo una nueva fibra sintética derivada de la aramida, el Kevlar, con el que también se comenzaron a elaborar parches. Pese a su gran resistencia e incomparable durabilidad, generaban muchas afecciones en las manos de los bateristas (por rebote excesivo) como tendinitis y síndrome del tunel carpiano; por otro lado, ofrecían muy poca resonancia y un estrecho rango tonal.

Es así que progresivamente fue restringiéndose la utilidad del Kevlar a dos situaciones específicas: la confección de protectores contra impacto y la elaboración de parches para tambores de marcha. Hoy en día el Mylar sigue siendo el material preferido para la confección de parches.

Entre los más prominentes fabricantes de parches a nivel mundial se incluyen empresas como Aquarian, Attack, Evans y Remo. Hay acuerdo general respecto a que uno de los determinantes mayores en el sonido de un tambor es el parche, ya que es el generador del tono, es decir, de las frecuencias fundamentales que produce el instrumento dentro del espectro de sonido. El parche también tiene una gran influencia en el timbre, el ataque y el sustain del tambor. Es por esto, que a pesar de que el resto partes juegan un papel importante en el sonido final de la caja, es el parche el más interesante de analizar, pues es el elemento que más va influenciar en el sonido, y es el que más va a definir la curva de sonido del instrumento.

Como se muestra en la primera imagen de un parche moderno, el parche lleva un aro alrededor, con el fin de que se soporte una presión vertical hacia abajo sobre el aro del parche.



*Imagen 4: Parches de una batería*

Los aros son generalmente metálicos, aunque también existen variedades en madera. Esta presión la ejerce otro aro que lo cubre. En la segunda imagen se aprecia este aro de la caja, siendo a su vez presionado por los herrajes roscados. Es decir, los aros no dejan de ser elementos usados para garantizar que la presión se distribuye de forma igual por todo el diámetro del parche, a la vez que lo protege de la interacción directa con el elemento que presiona, para así aportar durabilidad y resistencia al diseño. Eliminando estos aros intermedios, el sistema se queda de la siguiente manera: la tensión en las membranas se consigue mediante varillas metálicas con tornillos que actúan independientemente en cada parche. Para apretar estos tornillos se utiliza una llave especial.



*Imagen 5: Caja estándar*

Algunos recordaremos que los instrumentos de música se podían dividir entre instrumentos que se afinan e instrumentos que no se afinan. Sin embargo, todos los instrumentos tienen su propia curva de sonido dentro del espectro, por tanto, todos están afinados o se afinan. Los timbales, son unos tambores usados en orquestas, que sí que entran dentro de los instrumentos afinados porque en las orquestas tienen varios timbales, cada uno afinado en una nota. [6]

De la misma manera que una guitarra se afina tensando o destensando la cuerda, un tambor se afina tensando o destensando el parche. Pero es evidente la diferencia a la hora de afinar un instrumento u otro, dado que en las guitarras o violines se busca una afinación determinada, usualmente estándar, para poder tocar casi cualquier canción. De tal manera que al tener la cuerda tensada para que, tocada al aire (sin pisar con el dedo en ningún traste) suene un Do, si pisamos en un traste determinado, obtendremos el Re, o el Mi. Sin embargo, en un parche, no hay trastes donde pisar con los dedos, solo tenemos un mismo parche tensado de una manera determinada, que al golpearlo con la baqueta, va a sonar siempre en la misma nota. Y esa nota determinada que da la caja depende de la tensión del parche. Por eso, cuando un percusionista aprieta o desaprieta los herrajes roscados, dicho de otra manera, tensa o destensa el parche; se dice que está afinando la caja.

En la práctica, un percusionista afina su caja al gusto, sin afinador, sin saber en qué nota va a sonar, dado que es un instrumento de percusión y su nota no se acaba de entender tan bien como las que da una guitarra. Lo que se busca, es que la composición del sonido de la batería entera, sea bonita, es decir, que ocupe un gran rango de frecuencias para que envuelvan y abran el sonido de la pieza musical que se vaya a tocar. Sin embargo, hay ocasiones que sí que vale la pena depurar el sonido al máximo: en orquestas, gente muy profesional con un oído muy fino, y sobre todo, en grabaciones profesionales de estudio, sí que se afina la caja con afinador. De tal manera que no solo tenga concordancia con el resto de partes de la batería, sino también con el resto de instrumentos. Así, es usual ver en una grabación varias cajas, afinadas en varias tonalidades, para buscar el sonido más perfecto posible, para cada una de las canciones.

Los afinadores electrónicos modernos captan el sonido, y te muestran en un display la frecuencia fundamental que está sonando dentro del espejo, es decir, la que te da la nota. Por ello, para afinar una caja se usa uno de estos afinadores, posicionándolo cuanto más cerca del parche mejor, y haciéndolo sonar. Para conseguir la afinación deseado, se va tensando y destensando el parche, apretando o aflojando los herrajes de forma igual, es decir, si aprieto media vuelta uno, aprieto esa misma media vuelta en todos, para que la tensión sea igual en cualquier punto del parche y la nota que suene no dependa de la localización del golpeo.

## 2.2.4 Baquetas y golpeo

A continuación se muestran unas baquetas estándar, para entender mejor el presente trabajo.



*Imagen 6: Baquetas estándar*

Existen multitud de tipos de baquetas usadas para el golpeo de un instrumento de percusión. Pueden variar los materiales, desde maderas de abedul, Carya (hickory), arce o roble, hasta baquetas de fibra de carbono. Estuve investigando acerca de este tipo de baquetas de fibra de carbono porque me parecía muy interesante poder acabar con la obsolescencia de las baquetas de madera, y así también ayudar al medioambiente, y por ello me tomaré la libertad de explicar su uso.

Estas baquetas de fibra de carbono tienen mayor duración y coste, pero salen rentables, pues a pesar de costar entre 3 y 4 veces más, duran 5 veces más como mínimo. En el golpeo que se ejecuta tocando la batería, se genera una gran cantidad de energía, la cual acaba produciendo el sonido. Toda esa energía se reparte entre la parte que golpea (brazo y baqueta) y la parte golpeada, es decir, la caja, timbales, platos... Generalmente son las baquetas de madera lo que antes se desgasta, se rompen, y hay que reponer. Sin embargo, al golpear con un material más duro que la madera, como la fibra de carbono, lo que acaba desgastándose más son los parches de los timbales y caja, y los platos. De

tal manera que con este tipo de baquetas de fibra de carbono, ahorras dinero a la hora de comprar baquetas, sin embargo, la vida útil del resto de componentes decae. Y aunque los precios de los parches no son muy elevados, los platos de gama media-alta, suelen estar hechos a mano con aleaciones muy particulares, por lo que se encarece el precio de estos instrumentos enormemente, y por tanto, a la larga, acaba saliendo más rentable comprar baquetas de madera estándar.

Cada tipo de baqueta se usa con un propósito en concreto, buscando un sonido particular y también la comodidad del instrumentista, ya bien sea por tacto o peso. Pero todas ellas se encargan de excitar el parche o plato que golpean. Es decir, la baqueta puede aportarle unas características al sonido, pero el sonido en sí, lo aporta el parche. Tal es así, que los modos de vibración, las frecuencias fundamentales que suenan en el golpeo, son independientes de la baqueta, solo dependen del parche. Así, podemos usar una baqueta con punta de madera, de resina o de espuma; golpeando con más o menos fuerza, lo que hará que el sonido tenga más o menos ataque, más o menos volumen... Pero será el parche el que aporte lo esencial del sonido.

Es por ello, que el análisis no se centra en la baqueta, más que para simular el golpeo de la punta o bellota de la baqueta.

### 2.2.5 Elementos usados para variar el sonido de la caja

A la hora de tocar la caja, es común emplear ciertos productos para variar el sonido de la caja. Esta necesidad le surge a la gran parte de los músicos cuando tocan dentro de un grupo en el que de todas las frecuencias que es capaz de escuchar el oído humano, hay que dejar hueco para todos los instrumentos. Esto es fundamental en la música actual, cada instrumento genera unas vibraciones que llevan asociadas unas ondas y estas, unas frecuencias. Si un instrumento transmite muchas frecuencias a nuestros oídos, tanto frecuencias agudas como graves, diremos que ese instrumento tiene mucho cuerpo, y será agradable escucharlo sonando sin acompañamiento. Sin embargo, un instrumento claramente agudo como el violín, no diríamos que tiene cuerpo. Cuando lo que buscamos es un sonido compuesto por varios instrumentos, y tocamos varios instrumentos con mucho cuerpo a la vez, el oído percibirá muchas frecuencias similares de diferentes fuentes sonoras, y le resultará complicado de entender y disfrutar, entonces diríamos que el sonido es abrumador o que no está bien definido, y la sensación no será buena.

Dentro de un estudio de grabación, el sonido de cada instrumento se graba por separado y se edita por ordenador o mesa de mezclas. Debido a esto, el problema de que haya demasiadas frecuencias no nos importará, pues podremos recortar las frecuencias que no queramos.

Siguiendo esta lógica, es fácil entender que el sonido de la caja, que aporta tanta personalidad y tantas frecuencias a la música, deba ser controlado o modificado cuando se quiere tocar dentro de un grupo, y por tanto, a la vez que otros instrumentos que también piden gran cantidad de frecuencias como las guitarras eléctricas.

Si estamos hablando de frecuencias, entonces estamos de la frecuencia fundamental y de los armónicos que acompañan a ese tono fundamental. Por ello, los productos que se usan para esta variación del sonido de la caja, se llaman comúnmente quita-armónicos y en inglés se nombran como “control rings”.

Cada fabricante de parches de batería propone una solución, incluso hay soluciones rudimentarias y baratas para evitar los armónicos que resulten incómodos al oído. Una de las soluciones más empleadas por los baterías que no quieren gastar dinero en ello, es colocar uno o dos trozos de cinta aislante o celo en la parte exterior del parche, muy cerca del aro que lo rodea. Además de esta posibilidad, hay dos que también son muy empleadas por los músicos.

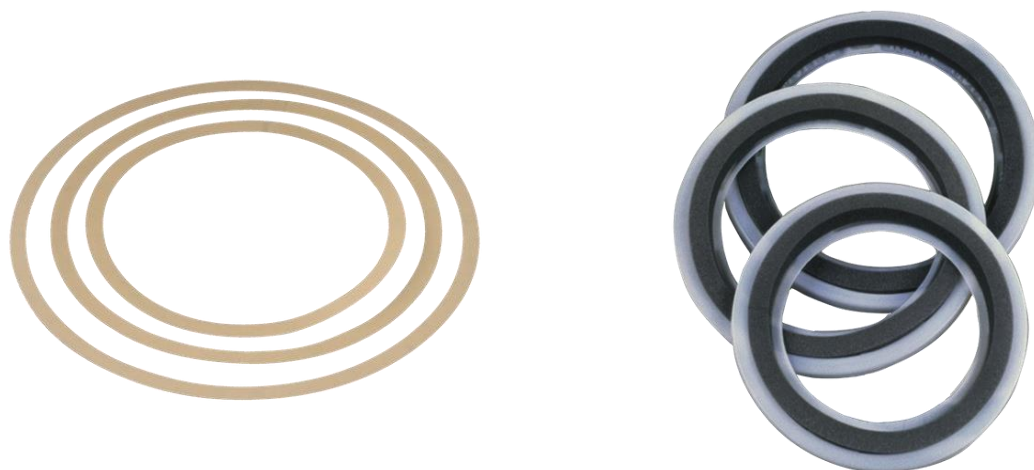
Por un lado están los aros quita armónicos. Son unos aros que se colocan encima del parche, estos aros son coronas circulares de entre 3 y 5 centímetros de radio. El material empleado es también el Mylar, el mismo material que emplean para los parches, pero suele tener más espesor que el de los parches. Este elemento no se pega ni se encaja, simplemente se deja reposar. Su radio exterior es un poco menor que el parche sobre el que se coloca para que se aloje fácilmente y se mueva lo menos posible. A continuación se muestra una imagen de un grupo de control rings con diferentes diámetros para colocar sobre el bombo, los timbales y la caja.



*Imagen 7: Aros quita-armónicos*



Otros elementos con esta misma utilidad son una mezcla entre los dos anteriormente nombrados, es decir, un aro como la imagen de encima pero con una cara cubierta de adhesivo para pegarse encima del parche. Algo así como una pegatina que se pega sobre el parche. Se muestra una imagen a continuación. Y en otros casos, los aros tienen una espuma adherida.



*Imagen 8: Otros elementos quita armónicos*

Es interesante reflexionar sobre que una de las posibles utilidades del presente trabajo es crear una herramienta para analizar este tipo de elementos previa fabricación, o incluso mejorarlas. De hecho se han analizado algunos de estos elementos, de tal manera que se puede ver la respuesta real del parche al colocar este tipo de elementos. Lo interesante, es que cuando se refiere a la respuesta del parche me refiero al sonido real que genera el parche. De tal manera que fabricantes como Remo o Evans podrían emplear esta herramienta para así buscar soluciones a nuevos problemas que surjan, a problemas que ya les aparezcan o simplemente, probar maneras de que el sonido varíe buscando un efecto determinado u otro.

Además de los elementos mostrados anteriormente, hay uno especialmente bueno y usado, aunque algo más caro, llamado Moongel.



*Imagen 9: Moongel estándar*

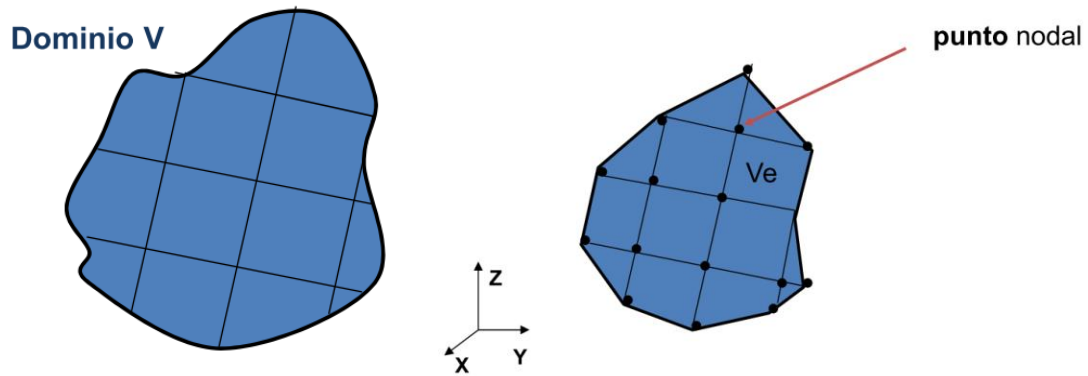
Como se muestra en la imagen, los moongel son unos rectángulos de gel o gelatina, con unas propiedades absorbentes del sonido para evitar variar el propio sonido del parche, pero que se colocan sobre el mismo para crear una serie de modificaciones o perturbaciones en las vibraciones. Realmente, su masa es pequeña, aunque comparada con la masa del parche, es lo suficiente como para que las vibraciones del parche se vean afectadas por el moongel. Este es uno de los elementos que se estudian en este análisis tensional del conjunto baqueta-caja de una batería. Más adelante se mostrará cómo se ha informatizado este elemento y los resultados que se han obtenido.

## 2.3 Método de Elementos Finitos [1] [6]

El método de elementos finitos permite obtener el campo de desplazamientos, tensiones y deformaciones de un dominio  $V$  previa división de dicho dominio  $V$  en varios subdominios. En nuestro ejemplo, el dominio  $V$  sería el parche. Es decir, nuestro parche sería el conjunto o sistema a estudiar o analizar. Para explicarlo más intuitivamente:

Primero se discretiza el sistema continuo en elementos interconectados, es decir, se divide nuestro parche en multitud de elementos, llamados elementos finitos. Este método se basa en que estos elementos son más pequeños y simples. Todos estos elementos forman la “malla” del sistema. Estos elementos no se solapan.

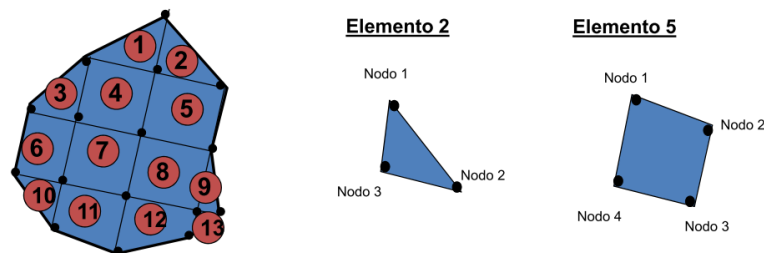




*Imagen 10: Discretización de un volumen*

De tal manera que en la malla tenemos elementos, que serían los pequeños cuadrantes, y los nodos o puntos nodales, que pueden estar conectados con 1, 2 o más elementos finitos del modelo.

Visto de otra manera, cada elemento finito genérico contiene un determinado número de nodos:



*Imagen 11: División de los elementos de un sistema*

Seguidamente se especifica el comportamiento de cada elemento mediante un conjunto finito de parámetros. En nuestro sistema, este comportamiento lo especificaremos con los parámetros geométricos del parche y también con las propiedades del material. Así, cada elemento tendrá las propiedades del Mylar y el espesor del parche. En tercer lugar se ensamblan los elementos y por último se resuelve el sistema. Se debe entender que el coste computacional de este método es altísimo, por ello, se depende de un ordenador para realizar este tipo de cálculos.

En nuestro sistema, usaremos el programa Abaqus para realizar este cálculo de Método de Elementos Finitos. Este método es muy usado hoy día dada la gran fiabilidad que tiene. En el pasado, cuando se realizaba un diseño, la única manera de ensayarlo y comprobarlo era por medio de prototipos, aumentando con ello una barbaridad el costo del diseño. Sin embargo, tras el uso de programas como este, la fase de diseño se podía abaratar enormemente.

Este programa en concreto, es capaz de recoger numerosos datos de los materiales y de las fuerzas, deformaciones y desplazamientos del sistema. En nuestro sistema en concreto, no solo vamos a conseguir discretizar el parche, añadiéndole las propiedades del Mylar y las propiedades, sino que también vamos a aplicarle deformaciones, desplazamientos y tensiones. Estos campos de fuerzas provienen en la realidad del conjunto de la caja, con los herrajes y el cilindro de madera, así como del golpeo de la baqueta. Esto creará unos desplazamientos y unas vibraciones que Abaqus nos dará como resultados con gran detalle. Más adelante se desarrollará en detalle cómo se ha empleado este método.

Este método, y en particular el programa Abaqus, te da la oportunidad de obtener una gran variedad de resultados. El presente proyecto se centrará en obtener dos tipos de resultado, primero los modos propios del parche y seguidamente una gráfica espacio temporal de un punto del parche.

Los modos propios del parche no dejan de ser las diferentes maneras que tiene el parche de vibrar, mostrando así las posibles frecuencias que se oyen cuando se mueve el parche, por tanto, sus notas y armónicos. Aunque se desarrollará más adelante, es importante entender que Abaqus nos mostrará todas las posibles maneras de vibrar que tiene el parche, con todas las posibles frecuencias que es capaz de transmitir. En este análisis en concreto no interviene el golpeo, por tanto no nos dará una información real de cómo va a sonar el parche, pero sí todas sus posibilidades de cómo podría sonar.

Dicho de otro modo, en un golpeo normal no van a sonar todas las posibles frecuencias, dado que, como se verá más adelante, un golpeo excitará al parche de una manera determinada. Es decir, cada golpeo lo hará vibrar y sonar de una manera en concreto. Como ya explicamos anteriormente, el objetivo de este trabajo es ver cómo varían el sonido del parche, en función de las variables. En este caso, al no tenerse en cuenta el golpeo, las posibles formas de vibrar del parche solo dependerán de las propiedades del parche y de cómo esté tensionado.

Por otro lado, pretendemos sacar una gráfica del desplazamiento del parche, en concreto de un punto céntrico del parche. Estos otros resultados sí que tendrán en cuenta el golpeo. La información que sacamos de Abaqus por sí misma no nos aporta ninguna información de cómo suena el parche, dado que solo nos dirá cómo se mueve un punto del parche. Sin embargo, gracias a la transformada rápida de Fourier, somos capaces de transformar esta información aparentemente inútil para este estudio, en información acerca del sonido del parche. Más adelante se analizarán en detalle estos resultados.

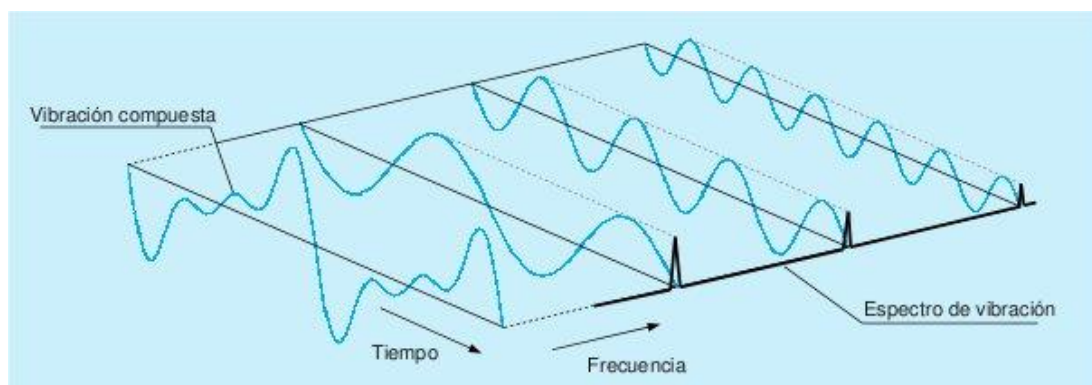
## 2.4 Transformada Rápida de Fourier

La FFT o Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) es una operación matemática que consigue, a partir de una gráfica espacio-temporal, una gráfica amplitud-frecuencia. Para situarnos dentro del presente proyecto, se debe aclarar que la FFT la usaremos para transformar una gráfica espacio temporal que nos ofrece Abaqus en una gráfica que represente el sonido, una gráfica amplitud-frecuencia. La gráfica espacio temporal que nos reportará como resultado Abaqus la obtendremos tras analizar el movimiento de uno de los puntos del parche, en concreto, un punto situado en la parte central del parche.

El parche dispuesto a estudio es un sistema vibratorio, que tiene una serie de posibles vibraciones, cada una asociada a una frecuencia (nota musical) determinada. Dentro de esas posibles vibraciones, podemos excitar el parche de una u otra manera para que el parche vibre según varias de esas posibles vibraciones. Esa excitación la conseguimos por medio del golpeo de la baqueta sobre el parche. Así, el parche puede ser estudiado como un sistema que vibra, de la misma manera que una máquina.

Cualquier sistema vibrante, genera unas ondas, es decir, se pueden estudiar esas vibraciones dentro de una gráfica espacio-temporal, para después por medio de la FFT analizar los ruidos o sonidos que va a generar. Esas vibraciones son ondas complejas dentro de la gráfica espacio temporal. Una onda compleja es aquella que se compone de diferentes ondas superpuestas, y por tanto puede ser analizada como una “suma” de diferentes ondas.

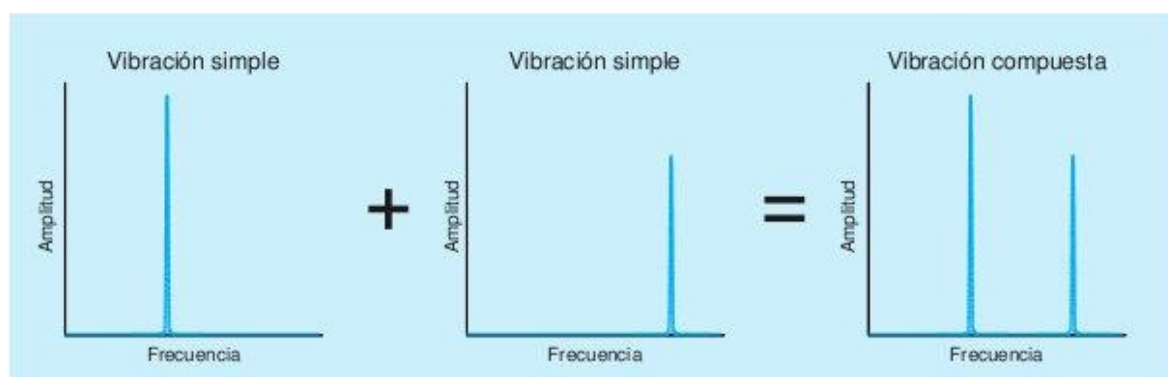
Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos. De hecho, hay un aparato llamado “analizador de espectros” que lo que hace al trabajar con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal de una máquina, calcular las vibraciones que genera, para seguidamente calcular todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja, es decir, descomponer esa vibración compleja en ondas simples, sinusoidales. Y por último muestra esas ondas simples de forma individual en una gráfica de espectro, como se muestra en la figura siguiente: [8]



*Imagen 12: Procesado FFT de una onda vibratoria compleja*

En esta figura se aprecia una gráfica con el eje del tiempo y el de la frecuencia. Sobre el dominio del tiempo, aparecen cuatro ondas, de las cuáles, la primera es una vibración compuesta, y las otras tres son ondas sinusoidales simples que componen la primera compleja. Si recordamos la figura en la que se mostraba la frecuencia fundamental con sus armónicos sobre una gráfica amplitud-tiempo, nos daremos cuenta de que estamos hablando de lo mismo. La primera onda sinusoidal simple sería la de la frecuencia fundamental de esta vibración, tendrá más amplitud que las otras dos ondas. Y estas otras dos ondas serán los armónicos de la vibración, es decir, de la onda compuesta.

En el otro eje, el eje de la frecuencia, se aprecia el espectro sonoro de esa vibración, mostrando tres picos de frecuencia, primeramente el pico más alto, con más amplitud, que marca la frecuencia y el volumen de la frecuencia fundamental, la que marca la onda. Y seguidamente se aprecian los otros dos picos referentes a los armónicos, de menor amplitud. Como se muestra en la siguiente figura, lo que se está haciendo es pintar la misma onda pero en el espectro de la frecuencia, con la particularidad de que ofreciéndolo sobre el eje de la frecuencia resulta obvio obtener las frecuencias y amplitudes de las componentes, y por tanto, obtener así el sonido que genera esa vibración:



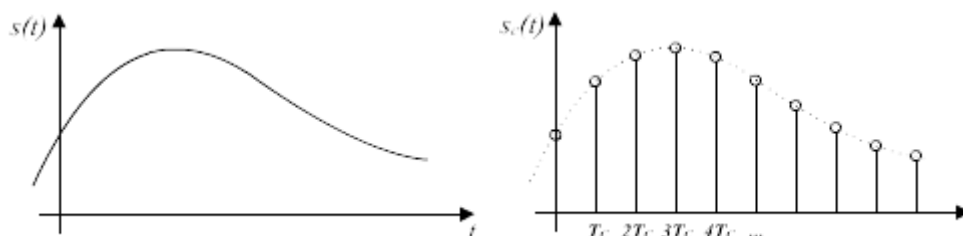
*Imagen 13: Constitución de una vibración compuesta a partir de varias simples*

De la misma manera que para utilizar el método de elementos finitos se usa el software Abaqus, para este proceso usaremos otro software llamado Matlab. Matlab es

una herramienta matemática que ofrece un entorno de desarrollo con un lenguaje de programación propio. A grandes rasgos, podríamos decir que es una calculadora, que al tener su propio lenguaje de programación, ofrece una gran cantidad de operaciones y visualizaciones. El uso que le vamos a dar a Matlab será la de realizar la FFT, y visualizar el espectro del tiempo y el de la frecuencia. Por esto mismo, no tendremos muchas líneas de código, y más adelante se explicará en detalle cómo usaremos este programa y cómo se realizará la FFT.

Hay que entender ciertos hechos de este proceso, dado que la gráfica espacio temporal que sacamos del programa Abaqus, no es una gráfica perfectamente definida, sino que es una gráfica mostrada a partir de una tabla de puntos con coordenadas  $x$  e  $y$ . Realmente lo que exportaremos del Abaqus será una cantidad determinada de puntos de dos dimensiones, es decir, con una coordenada  $x$  y otra  $y$ . Al partir de una cantidad determinada de puntos para operar con ella hasta obtener otra gráfica, de tal manera que el proceso sea matemáticamente correcto, preciso y reversible, debemos tener una “frecuencia de sampleo mínima”.

La frecuencia de sampleo o muestreo de una señal, en este caso una señal espacio-temporal, es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman. Imaginemos que nuestra señal espacio-temporal (que es el movimiento de un punto céntrico del parche) es la primera imagen de las dos que se muestran a continuación y empezamos a sacar puntos de esa señal como se muestra en la segunda imagen. Esos puntos son los al final usaré para mi FFT:



*Gráfica 2: Muestreo de una señal*

Como vemos en la segunda imagen, cada  $T$  segundos, se toma un punto, se muestrea la señal, por tanto, la frecuencia de muestreo sería  $1/T$  Hz dado que es la inversa del segundo, la unidad es Hz. Si ese intervalo de tiempo  $T$  fuese medio segundo, es decir, cada medio segundo tomamos un punto de la señal, nuestra frecuencia de muestreo sería  $1/0,5 \text{ s} = 2 \text{ Hz}$ .

Según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder obtener a partir de la FFT un espectro de sonido hasta una frecuencia máxima, siendo matemáticamente reversible en su totalidad, es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la frecuencia máxima. De tal manera, que si queremos mostrar todas las frecuencias que puede oír el oído humano, esto es hasta  $20.000 \text{ Hz}$ , esta sería la

frecuencia máxima. Por tanto, la frecuencia de muestreo debe ser superior al doble, es decir, superior a  $40.000\text{ Hz}$ , que transformándolo a segundos:  $1 / 40.000\text{Hz} = 2'5 \times 10^{-5}\text{s}$ .

Es un error frecuente y extendido creer que una misma señal muestreada con una frecuencia de muestreo elevada se reconstruye mejor que una muestreada con menor frecuencia de sampleo. Esto es falso (siempre que las tasas empleadas cumplan el criterio de Nyquist, naturalmente). El proceso de muestreo es, desde el punto de vista matemático perfectamente reversible, esto es, su reconstrucción es exacta, no aproximada. Dicho de otro modo, desde el punto de vista matemático al que se refiere el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, la reconstrucción de una señal de  $10\text{ kHz}$  es idéntica tanto si se obtiene de una tasa de muestreo de  $25000$  muestras por segundo como de una de  $50000$  muestras por segundo. No aporta nada incrementar la frecuencia de muestreo una vez que ésta cumple el criterio de Nyquist.

Siguiendo esta lógica, no tiene sentido usar una frecuencia de sampleo mayor a  $40\text{ KHz}$ , dado que no hará que mejoremos la exactitud, solo nos posibilitaría mostrar más frecuencias, pero al no ser frecuencias audibles, no nos interesa su estudio. Este teorema lo usaremos más adelante en la configuración de ciertos parámetros del análisis, al igual que en la programación del programa en Matlab. [9]

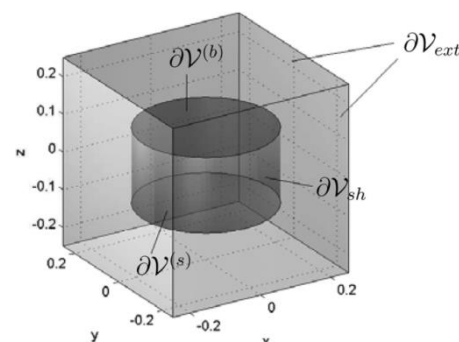
## 2.5 Estudios similares

Antes de tomar la decisión definitiva de realizar este proyecto, se revisaron diferentes trabajos, artículos o libros que tratasen sobre este tema o temas similares. Por ejemplo, existen trabajos que tratan el amortiguamiento o "damping" del parche, explicándolos de forma divulgativa, otros que analizan las cajas sordas, que son elementos que simulan una caja, pero evitando el sonido. Estas cajas sordas se emplean para practicar sin molestar al vecino o también en las baterías electrónicas. Entre todas las obras que analizaban científicamente la música, hubo tres que me resultaron especialmente interesantes y que realizan estudios similares, aunque usando diferentes herramientas y con diferentes objetivos. Resulta muy interesante explicar brevemente estas tres obras para generar una mayor amplitud de conocimientos en el presente trabajo. Estas tres obras son:

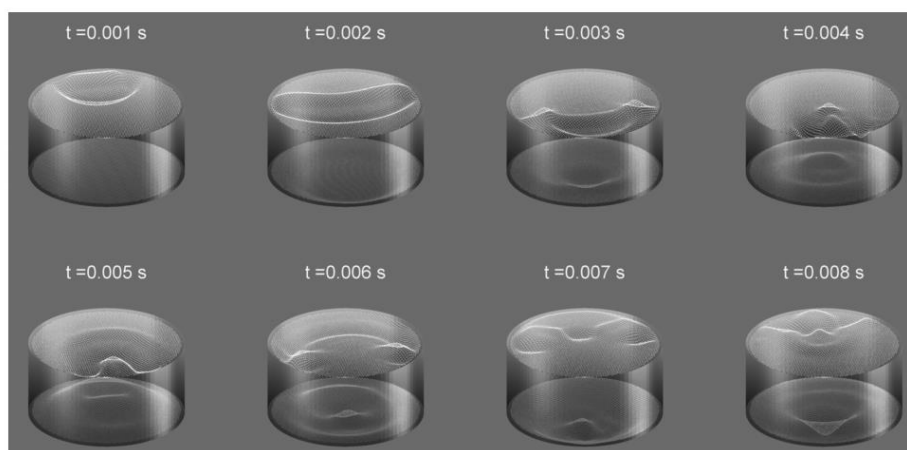
- Bilbao, Stefan. Enero 2012. Time domain simulation and sound synthesis for the snare drum *Acoustical Society of America*, Vol 131, No. 1, Pt. 2 [11]
- Vasileios Chatziioannou, Maarten van Walstijn, Diciembre 2014. Energy conserving schemes for the simulation of musical *Journal of Sound and Vibration, Elsevier*. [12]
- Merino de la Fuente, Jesus Mariano, 2006. *Las vibraciones de la música* Editorial Club Universitario. [13]



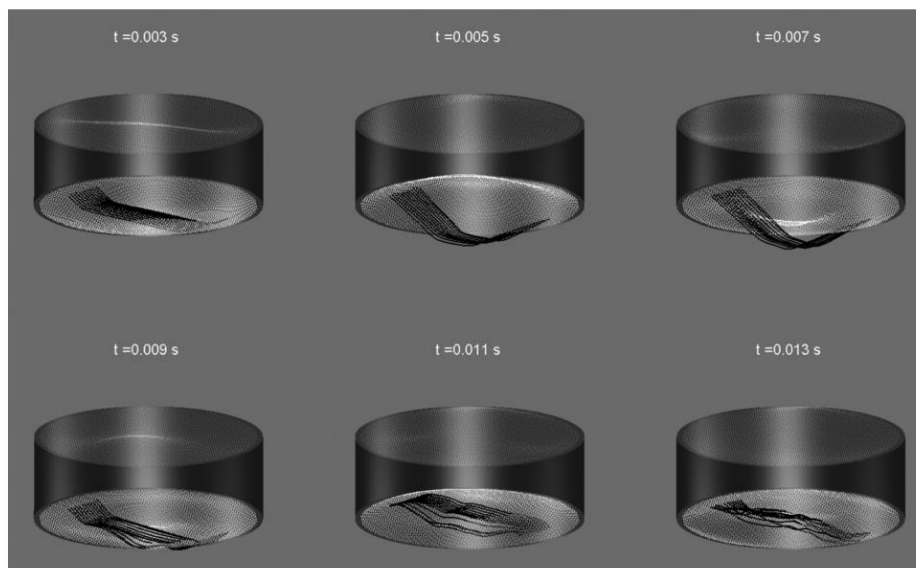
En las once páginas del artículo de Stefan Bilbao, se analiza una caja matemáticamente de forma muy detallada. En él, no solo incluye el parche como en este proyecto, sino que analiza la caja entera, con la bordonera, el cilindro de madera y el parche de abajo. Se ha usado este trabajo para guiarme un poco en las propiedades del material y entender mejor los resultados que me deberían de salir antes de conseguirlos. El análisis matemático resulta muy completo, está basado en el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo. Este método se utiliza para resolver problemas electromagnéticos transitorios utilizando diferencias finitas. El método fue desarrollado por Kane Yee en 1966 para resolver las Ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones en derivadas parciales se reemplazan por un sistema de ecuaciones en diferencias finitas. Eligiendo convenientemente los puntos en que se evalúan las componentes de los campos en estas ecuaciones, la solución al sistema de ecuaciones satisface las condiciones de borde que involucran superficies conductoras ideales. Este método es un caso particular del método de Diferencias Finitas, que es un método standard para la resolución de Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP). [10]



A partir de este método, se presentan dos figuras muy interesantes en el artículo, en las que se aprecian las vibraciones del parche y de la bordonera. En el presente trabajo se mostrarán figuras similares pero en mi opinión más resolutivas e intuitivas.



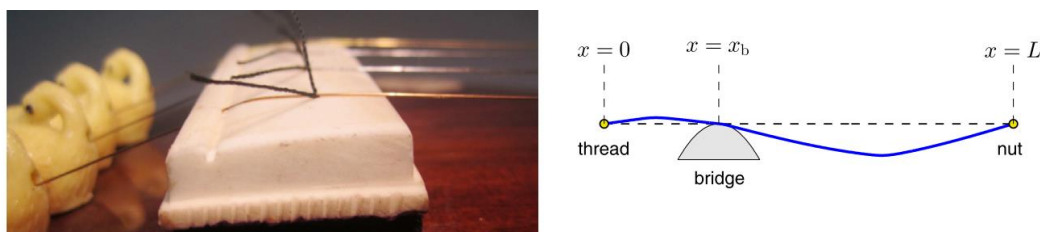
*Imagen 14: Modos de vibración del parche según el trabajo de Stefan Bilbao*



*Imagen 15: Modos de vibración de la bordonera según el trabajo de Stefan Bilbao*

También se muestra una figura del espectro sonoro con diferentes densidades del material empleado para el parche. Esta es una de las variables que se han analizado en el presente trabajo, con la diferencia de que este proyecto está basado en materiales reales que se usan hoy día en la industria.

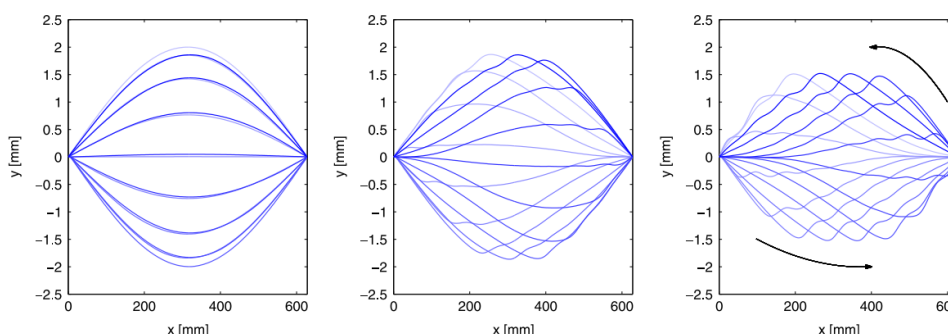
El artículo “Energy conserving schemes for the simulation of musical” estudia el comportamiento vibratorio de los instrumentos musicales, centrándose más en la energía que se crea en los impactos, golpes o accionamientos de los instrumentos y cómo esa energía se convierte en sonido, gracias a las vibraciones controladas del instrumento en cuestión. Aparece un ejemplo muy interesante en el que se estudia una cuerda de una guitarra, y cómo vibra. Es decir, realiza un pequeño estudio del comportamiento de una cuerda de guitarra.



*Imagen 16: Vibración de una cuerda de guitarra*



Seguidamente presenta las instantáneas de cómo se desarrolla la vibración de la cuerda a lo largo del tiempo y del espacio, cómo se muestra en la siguiente imagen:



*Gráfica 3: Vibraciones de una cuerda de guitarra*

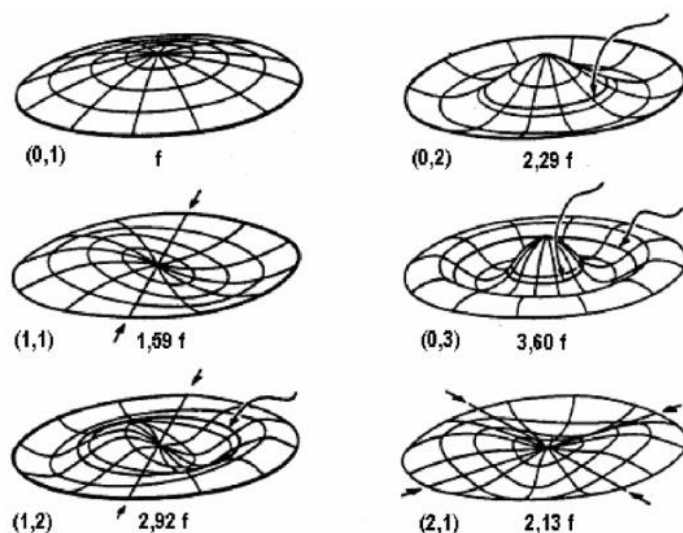
Este ejemplo resulta muy interesante dado que, a partir de él surge la idea de que el presente trabajo en el que se estudian cómo varía el sonido en función de los materiales, el tensado, la geometría y más, puede ser realizado también para otros instrumentos. En el caso de una guitarra existen infinitas aleaciones para las guitarras, e infinitas geometrías. De hecho, cabe dar a conocer un tipo de cuerda que se empezó a fabricar recientemente, con sección no constante, de tal manera que la sección es constante a lo largo del mástil de la guitarra, pero en el punto de apoyo disminuye su sección para conseguir así un apoyo más preciso sin variar el sonido. El buen o mal funcionamiento de este tipo de avances, basando los resultados sobre un método científico, y comprobando los resultados antes de necesitar fabricar la cuerda, es uno de los posibles objetivos de un trabajo como este. A partir del presente proyecto se podrían probar diferentes materiales nuevos y diferentes métodos de tensarlo o golpearlo para comprobar, previa fabricación, si sonará como se pretende.

Por último, el libro de Jesus Mariano Merino de la Fuente llamado “Las vibraciones de la música” me resulta un libro muy completo. En sus cuatrocientas páginas explica de una manera divulgativa todo lo referente a qué es el sonido. Comienza el libro explicando principios físicos y mecánicos necesarios para la comprensión completa de la música. Seguidamente explica las ondas, sus clases, su naturaleza y su propagación. Después se centra en el sonido, es aquí donde explica qué es la intensidad (volumen), el tono (nota o frecuencia fundamental), el timbre (armónicos que acompañan al tono) además de explicar las escalas musicales, los intervalos y otros aspectos de la música. Más adelante se centra en los instrumentos haciendo un recorrido por todos ellos, incluso de la voz humana, y por la manera que tiene cada uno de generar y transmitir las vibraciones. Aquí es donde habla de los instrumentos de percusión como la caja, aunque se centra más en el timbal, por su importancia a lo largo de la historia como instrumento dentro de una orquesta. También explica la percepción del oído humano y la importancia de los recintos musicales, es decir, lo importante que es el lugar donde se escucha la música. Por último expone los diferentes aparatos que recogen y

transmiten el sonido, es decir, los micrófonos, altavoces y amplificadores; y explica la relación entre el ordenador y la música.

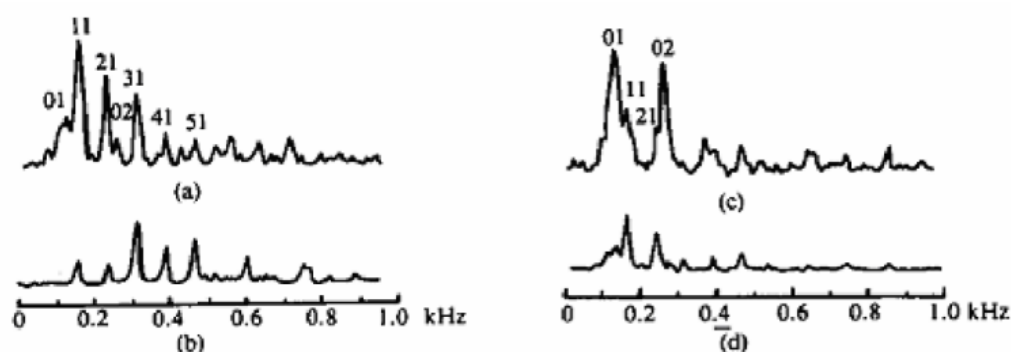
Este es un libro que todo músico debería leer, o como mínimo, ojear, para así entender qué es lo que realmente está sucediendo. Evidentemente, cualquier técnico de sonido debería tener estos conocimientos adquiridos. Cuando se dice “lo que realmente está sucediendo” nos referimos a que dentro de la música existen numerosas técnicas de tocar cada instrumento, al igual que técnicas de grabar, producir, componer... Pero siempre se habla de sonidos, de ondas, de vibraciones; y este libro me resulta especialmente interesante porque todas esas diferentes técnicas las relaciona científicamente con las ondas, y así se es capaz de conseguir una comprensión mucho más práctica y completa de la música.

Es muy interesante mostrar el estudio que hace sobre el timbal, dada su evidente relación con la caja. En particular aparece una ilustración en la que muestra los diferentes modos de vibración del timbal.



*Imagen 17: Vibraciones del parche según el libro de Jesus M. Merino*

También muestra un cuarteto de espectros de sonido sacados de un timbal. Estos espectros se han captado a 65 cm del parche. Dos de los espectros aparecen tras percutir el timbal en el punto habitual, es decir, al tratarse de un timbal, se percute a un cuarto del radio desde el borde; mientras que los otros dos aparecen tras percutir en el centro del parche. Hay dos espectros para cada punto de percusión, uno tras 0,03 segundos del impacto y otro tras 1 segundo. El punto habitual donde se golpea el parche es el que es porque el sonido es más agradable, pero, entender el por qué es lo interesante. Jesús Mariano Merino de la Fuente lo explica en su libro, y yo lo haré más adelante cuándo muestre los resultados del presente proyecto.



*Espectro de sonido 3: Variaciones de la ubicación del golpeo y momentos según el libro de Jesus M. Merino*

Los objetivos del libro se resumen en “dar a conocer las bases científicas sobre las que se asienta el hecho musical.” Este es también uno de los objetivos del presente proyecto, aunque nos centraremos más en el parche de la caja, y se irá más allá del simple análisis de una caja actual, para encontrar las variaciones de sonido que la acompañan, y de qué dependen.

## 3. Modelización en Abaqus

### 3.1 Introducción

Como ya se ha dicho, la parte de la caja de la que más depende el sonido de la caja, es el parche. El cilindro de madera que lo rodea caracteriza al sonido otorgando más duración o menos o más amplificación del volumen o menos. La bordonera que se coloca bajo el parche inferior, otorga un brillo a la caja, pero es un brillo similar en todas las cajas. Por tanto, lo que se ha modelizado es el parche. En dicho modelo se han parametrizado las interacciones que tiene el parche con el aro que lo presiona y la baqueta que lo golpea, aplicando las fuerzas o deformaciones que estos elementos generan. Además de esto, también se han tratado especialmente dos elementos que se usan para variar o modificar el sonido de la caja. Estos son los aros quita armónicos o “control rings” y los “moongel” y para cada uno de ellos se ha creado un modelo. En total, tres modelos diferentes que se van a informatizar, eligiendo sus propiedades, geometrías e interacciones.

El programa Abaqus no obliga a trabajar con unas unidades determinadas, tan solo se introducen números en los diferentes campos, por tanto, se debe escoger un sistema de unidades consistente. Por ejemplo, si se introduce una medida de espacio en metros y los tiempos los introduzco en segundos, si hubiese un campo de velocidad, no podría introducirla en kilómetros por hora, sino que tendría que convertir el dato de velocidad para que las unidades coincidan entre sí, en este caso tendría que pasar los kilómetros por hora a metros por segundo.

El sistema de unidades con el que he trabajado es el más certero en Abaqus. Como todos los sistemas de unidades, se fundamentan en unas unidades básicas de medida. Existen un total de siete medidas básicas, de las cuáles nos interesan tres para este tipo de análisis mecánicos. Estas son: Longitud, tiempo y masa. Las unidades del sistema internacional para estas tres medidas básicas son el metro para la longitud, el segundo para el tiempo y el kilogramo para la masa. Sin embargo, estas unidades del sistema internacional producen ciertos errores de cálculo, mientras que el sistema de unidades aconsejado comete menos errores. Este es el siguiente:

Longitud	Tiempo	Masa
Milímetros (mm)	Segundos (s)	Toneladas (Tn)

*Tabla 3: Unidades de medida escogidas para la simulación*

## 3.2 Parche

### 3.2.1 Propiedades y dimensiones del parche

En el mercado hay muchas cajas, la variedad es enorme dentro de un mismo fabricante de cajas y hay bastantes fabricantes, además de luthieres, o artesanos que se dedican a personalizar y fabricar por encargo instrumentos musicales. Por tanto, a la hora de tomar unos parámetros de los cuáles partir, se ha tenido que partir de los datos de una caja en concreto.

Hay dos razones por las que se ha escogido la caja que ha servido de modelo. Por un lado porque esta caja es bastante conocida entre los percusionistas. Por otro lado, porque es una caja estándar, que usa el batería del grupo de música “Red Hot Chili Peppers” y por eso la caja lleva su nombre. A continuación se muestra una imagen de la caja.



*Imagen 18: Caja escogida como modelo de partida*

Como se aprecia, no es especialmente alta ni baja, ni ancha o estrecha como puedan ser otras cajas. Pero como ya hemos dicho anteriormente, lo importante es el parche, y por tanto, realmente el análisis se basará no tanto en la caja sino en el parche de esta caja. Se puede leer que el parche es de la marca REMO, en concreto es el modelo Ambassador Coated:



*Imagen 19: Parche escogido como modelo de partida*

Como se puede apreciar, geométricamente el parche será sencillo de programar, dado que con el radio y el espesor lo tendríamos todo. Por otro lado, se necesita conocer el material y sus propiedades mecánicas para realizar el análisis. En concreto, necesitamos tres propiedades fundamentales. Estas son:

- Densidad: Relación entre la masa de una sustancia y su volumen. Con la geometría se puede sacar el volumen, y con esto y la densidad, se sacaría la masa de nuestro parche.
- El Coeficiente de Poisson: Relación entre la deformación que produce una fuerza sobre un cuerpo con una dirección, y la deformación que se produce en las direcciones perpendiculares. Es decir, si yo estiro un sólido, este sólido tiende a estrecharse, el coeficiente de poisson relaciona lo que se estira el sólido con lo que se estrecha.
- El Módulo de Young: Es la relación o razón de proporcionalidad entre el esfuerzo (fuerza por unidad de área) y la deformación unitaria (deformación por unidad de longitud) que sufre un sólido. En otras palabras, lo que se deforma un sólido, en función de la fuerza a la que se somete.

Para conseguir estas tres propiedades del material, lo primero es saber qué material constituía el parche. Como ya se comentó anteriormente, actualmente los parches se suelen fabricar con Mylar. Conocer la densidad de este material fue sencillo, sin embargo, las otras dos propiedades me resultaron más complicadas, dado que son propiedades técnicamente mecánicas. Pero tenía dos fuentes de las que conseguir estos datos.

Por un lado el trabajo de Stefan Bilbao. En este artículo se especifican estas propiedades para la caja que él analiza. Sin embargo, aunque las variaciones debieran ser nulas dado que es el mismo material, se decidió ponerse en contacto directo con Remo, para conseguir las propiedades del Mylar que empleaban en sus parches. Tras varios correos electrónicos, las comunicaron. Efectivamente, apenas discernían con las del trabajo de Stefan Bilbao, pero había pequeñas diferencias. Se escogieron las propiedades que indicó Remo para guardar más relación con la caja estándar en la que está basado el análisis.

Tras convertir las propiedades y dimensiones al sistema de unidades empleado, los datos iniciales son los siguientes:

Dimensiones:	Radio	177 (mm)
	Espesor	0,254 (mm)
Propiedades del Mylar:	Mod. Young	3400 (Mpa)
	Coeficiente de Poisson	0,3
	Densidad	1,38E-09 (Tn/mm <sup>3</sup> )

*Tabla 4: Datos del parche usado como modelo*

Abaqus nombra a cada pieza independiente de un sistema “part” por tanto lo primero que debemos hacer es la part del parche. Abaqus nos ofrece varias posibilidades a la hora de crear la part, nosotros debemos escoger la opción “Shell” usada para piezas que tienen una dimensión mucho menor que las otras dos, como es el caso del parche. Es en este momento donde indicamos el radio del parche.

Seguidamente se crea el material del que deseamos constituir nuestro parche. Es en este punto donde definimos las propiedades del material indicando en el campo correspondiente, la densidad, el coeficiente de Poisson y el módulo de Young.

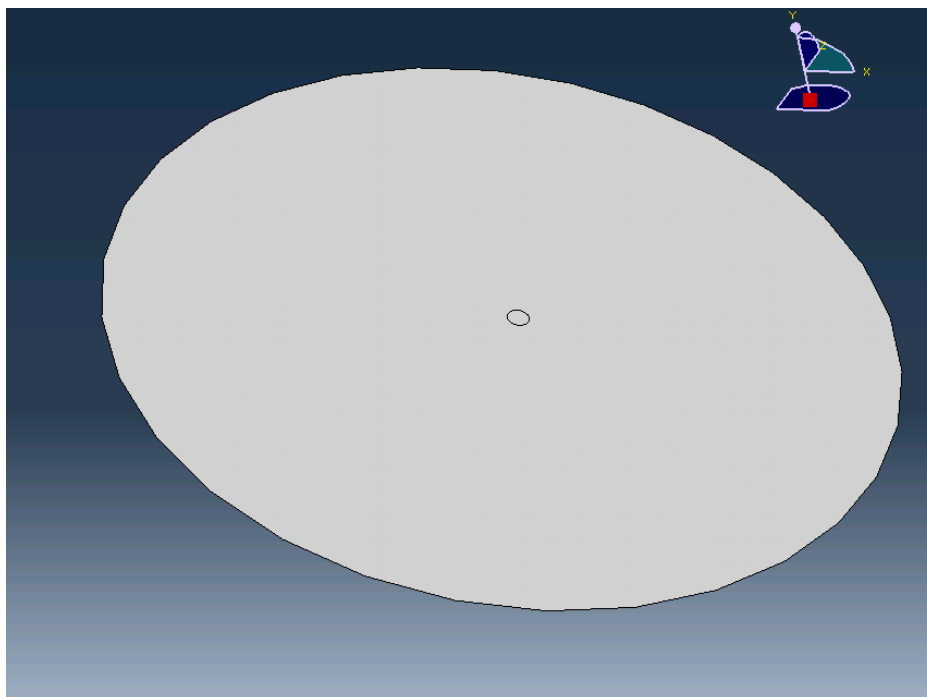
A la hora de escoger la sección del parche, debemos realizar el mismo ejercicio y elegir el tipo de sección Shell, y dentro de Shell, la opción Membrane, para especificar el tipo de comportamiento que debe tener la sección escogida. En este momento es cuando introducimos el espesor del parche. Y así finalizaríamos de modelizar nuestro parche, de tal manera que ya estaría informatizado o parametrizado dentro del programa.



### 3.2.2 Baqueta

La baqueta no se va a crear como una part nueva. Lo que nos interesa es el parche, por tanto, si podemos añadirle al parche unas condiciones que simulen lo que la baqueta le produce, ahorraremos tiempo y recursos computacionales. De esta manera eliminamos la posibilidad de que surjan problemas en la interacción entre dos sólidos diferentes.

Por tanto, lo que aparecerá en el modelo será una presión que simule el golpeo de la baqueta. Primeramente, debemos escoger una pequeña sección que simule el área donde golpea la baqueta. El extremo de una baqueta es redondeado, con forma de bellota, así que el área de golpeo será semejante a una circunferencia. Esta pequeña circunferencia se ha colocado en el centro del parche, dado que es la localización donde los músicos golpean las cajas. Así, el parche se ve en Abaqus de la siguiente manera:



*Imagen 20: Vista del parche simulado en Abaqus*

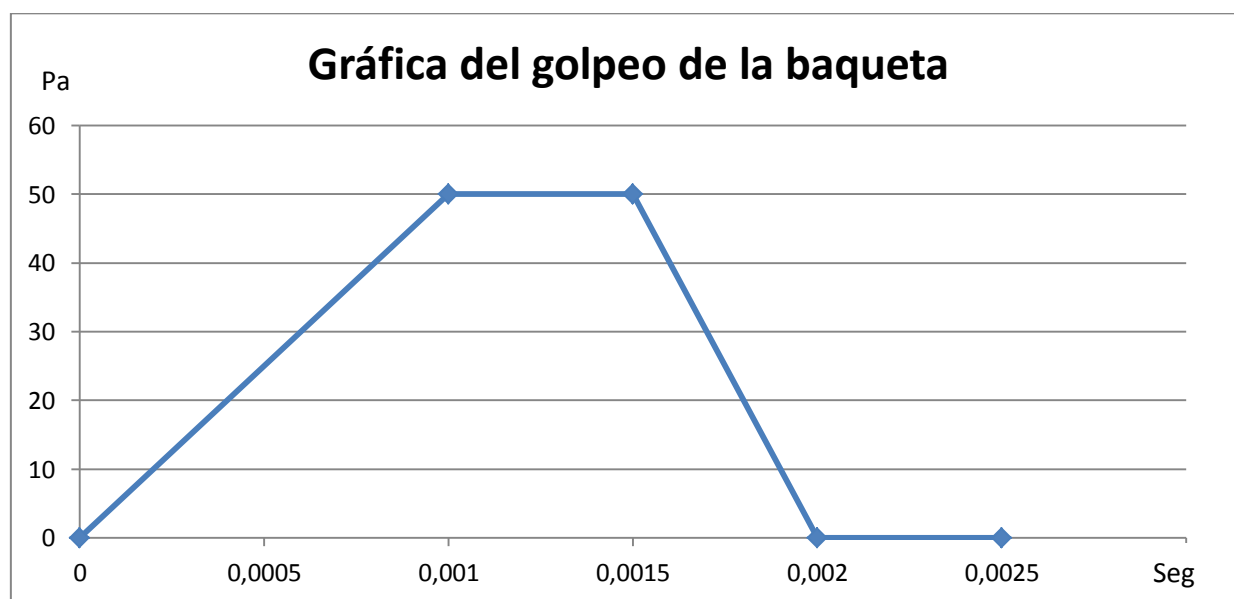
Abaqus tiene un entorno dedicado a las cargas llamado “Load”. Será aquí donde trabajaremos con los parámetros que simularán acción que crea la baqueta sobre el parche. Para esto, lo ideal hubiese sido usar una célula de carga y así conocer con precisión la acción que ejerce la baqueta. Sin embargo, este tipo de células se usan con otros propósitos, por lo que tendría que haber usado una célula no estándar, y esto sumado a que las estándar ya son equipos de medición caros, ha dificultado el acceso a estos datos.



No obstante, la fuerza con la que se golpea no es un condicionante importante para el sonido final del parche. Es evidente que si se golpea más fuerte, el sonido tendrá mayor volumen, dado que se transmitirá más energía al sistema. Y en función del tipo de baqueta empleada, podrás tener unos matices u otros. Pero para este análisis nos basta con una aproximación a la realidad.

Para representar el golpeo de la baqueta sobre el parche, se ha generado una curva que representa el golpeo de la baqueta, es decir, cómo empieza, discurre y finaliza la acción del golpeo. Esta curva empieza desde cero, el momento antes del contacto. Seguidamente la baqueta comienza a producir una presión sobre el área de contacto hasta un valor máximo, se mantiene en ese valor durante un corto período de tiempo para finalmente dejar de estar en contacto. Tras haber probado diferentes valores de presión máxima sobre el área, el valor realista con el que han salido resultados verosímiles, y por ello el que se ha usado como referencia, ha sido un valor de 50 Pascales de presión. Más adelante, en la parte de los resultados, se mostrarán diferentes valores de presión de golpeo para entender mejor lo que puede o no variar en función de este dato.

Así, la gráfica que representa la acción que ejerce la baqueta sobre el parche se muestra a continuación sobre un eje x de tiempo medido en segundos y un eje y de presión medida en pascales.



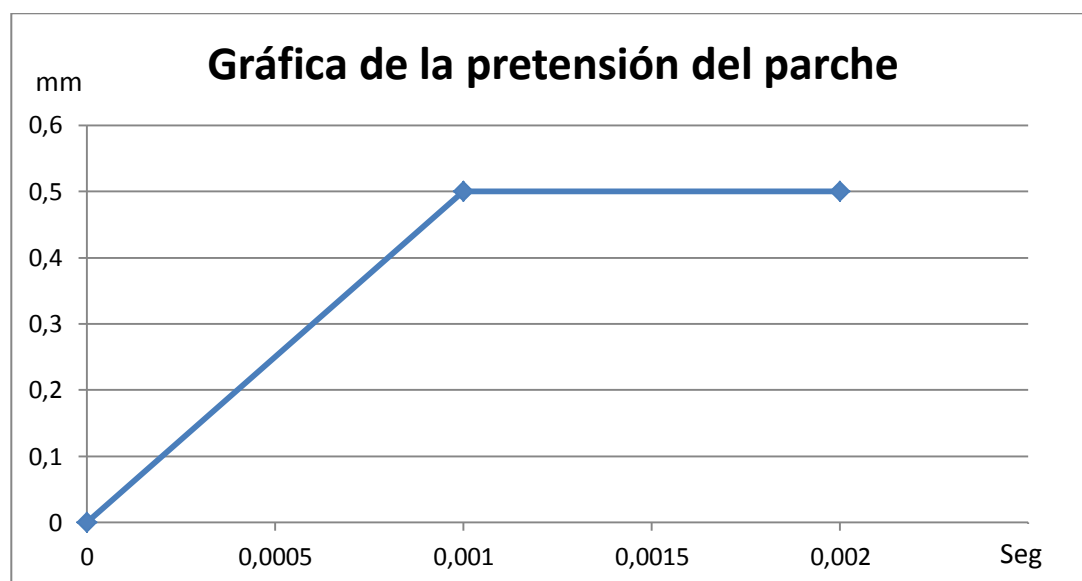
*Gráfica 4: Golpeo de la baqueta*

### 3.2.3 Aro de presión

Al igual que en el caso de la baqueta, nos ahorramos mucho tiempo, esfuerzo y problemas computacionales si simplemente simulamos la acción que ejerce el aro de presión sobre el parche. El aro de presión genera una presión hacia abajo sobre el aro de aluminio que recubre el parche. Pero aunque la presión se ejerce hacia abajo, el parche sufre un estiramiento a lo largo de todo su contorno en dirección radial. Dicho de otra manera, el parche entero está compuesto por el aro de aluminio que lo rodea, sin embargo, no es la totalidad del parche lo que suena, tan solo la parte superior plana. Dicha parte no está presionada hacia abajo, sino que experimenta un estiramiento radial en todo su contorno.

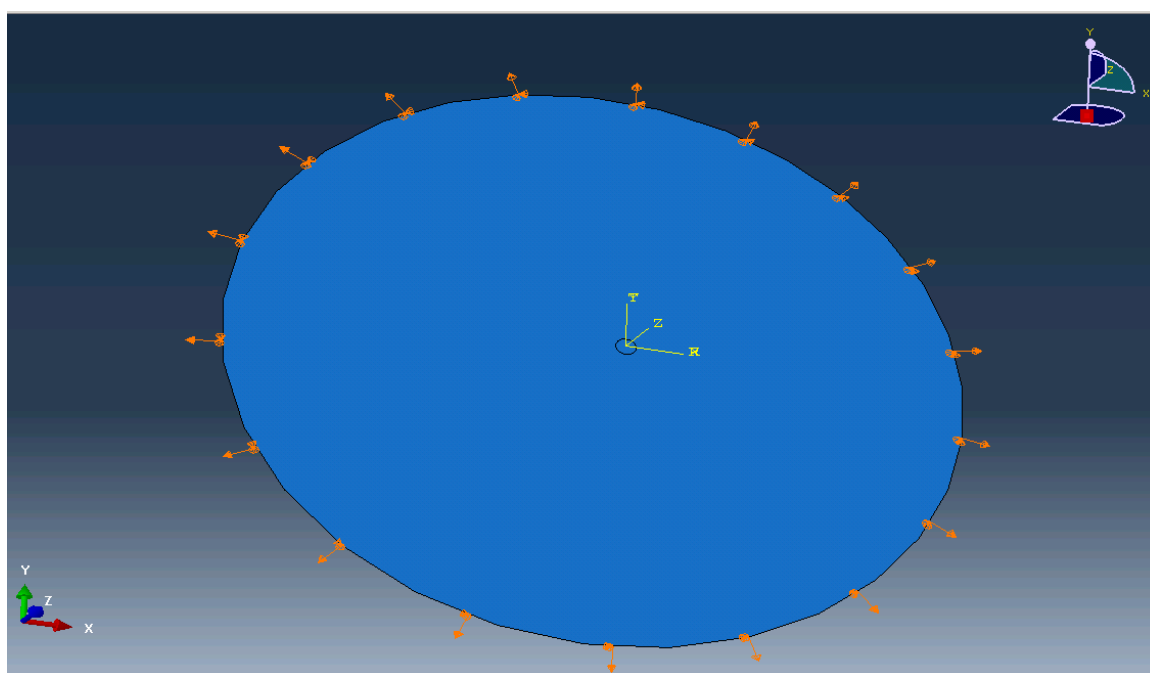
Este estiramiento se puede introducir en el entorno de Abaqus dedicado a las cargas de diferentes maneras. Por un lado, lo podemos introducir como una presión o fuerza a lo largo del contorno, y por otro lado se puede introducir como una deformación, dado que en realidad estamos informatizando la misma acción. Es decir, si introduzco una pretensión en forma de presión (MPa) o como una fuerza (Newtons) o como un desplazamiento (mm) lo que estoy haciendo en cualquier caso es estirar el parche. Esto es debido a que una presión o una fuerza, genera una deformación, y una deformación lleva asociada una fuerza o presión que la ha generado. Es decir, se puede introducir el mismo hecho de estiramiento de diferentes maneras.

Es más cómodo e intuitivo introducirlo como desplazamiento, dado que es más sencillo de medir. De la misma manera que con el golpeo, no tenía método preciso de medir esa deformación que se crea sobre el parche. Por ello el valor escogido del desplazamiento que sufre el parche fue escogido de cara a que los resultados tuviesen sentido y la deformación en sí también lo tuviese. Este valor escogido será uno de los que variemos, por tanto, se mostrará en la parte de resultados cómo varía el sonido en función de este valor. Pero se necesita un valor de referencia inicial sobre el que basar el análisis. Este valor se ha introducido de la misma manera que la carga que genera la baqueta, usando una gráfica que muestre la manera de introducir la pretensión que genera la deformación. Sin embargo, aunque en el caso de la baqueta, el valor máximo aparece y desaparece, en este caso, permanecerá a lo largo del tiempo para simular que el parche se tensa y permanece tensado. El valor máximo que alcanza y en el que permanece es de 0,5 mm en dirección radial a lo largo de todo el contorno del parche. La gráfica sobre un eje x de tiempo medido en segundos, y un eje y de desplazamiento radial medido en milímetros se muestra a continuación:



*Gráfica 5: Pretensión del parche*

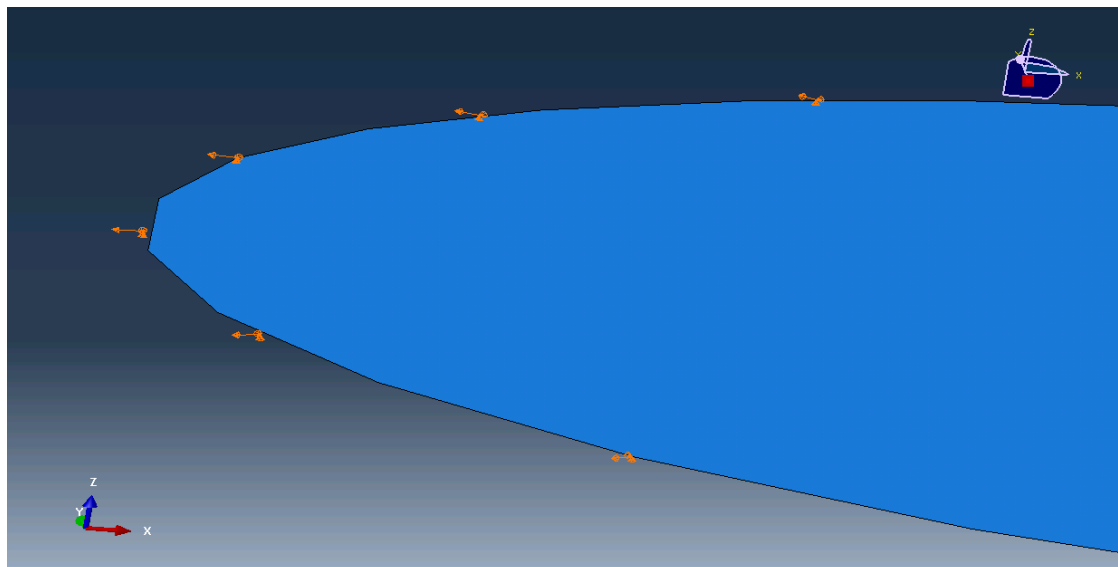
De tal manera que el parche quedaría de la siguiente manera:



*Imagen 21: Parche sometido a los esfuerzos de pretensión*

A pesar de no haber simulado el cilindro de madera, el aro de presión o los herrajes, en el módulo de cargas de Abaqus también introducimos las acciones que generan estos elementos sobre el parche. Estas acciones se aprecian en esta imagen anterior. A la hora de introducir la pretensión con el valor correspondiente en dirección radial, también introducimos un valor nulo, para las deformaciones en el resto de direcciones. Esto quiere decir que estamos introduciendo el hecho de que el parche permanezca quieto, y que no se mueva hacia arriba o abajo cuando aparezca el golpeo de la baqueta.

Si hacemos zoom en uno de los símbolos, vemos que aparecen esas condiciones de contorno que imposibilitan los movimientos en otras direcciones que no sean la radial. Estas condiciones de contorno son las que genera el cilindro de madera y la estructura de la caja en sí.

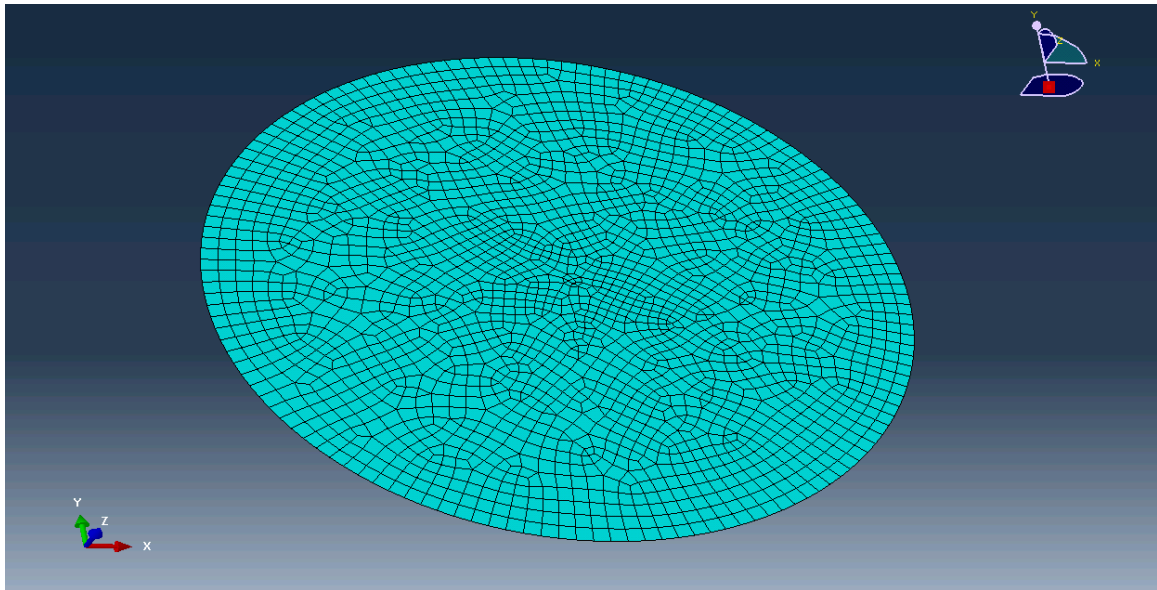


*Imagen 22: Detalle de los esfuerzos de pretensión del parche*

### 3.2.4 Mallado

Abaqus es un programa informático que resuelve estructuras y sistemas por el método de elementos finitos. Es decir, antes de analizar la información y tratarla para dar los resultados, debemos especificar el tipo de malla que queremos, de la cual dependerán los resultados. Cuanto más fina sea la malla, más exactos serán los resultados pero mayor coste computacional tendrá, así que, lo ideal sería poner un tamaño de elemento muy pequeño, para tener más elementos y que así los resultados sean más exactos. Sin embargo, esto nos llevaría mucho más tiempo de ejecución y análisis. Así que, lo que habría que saber es cuánta exactitud perdemos si hacemos una malla menos fina.

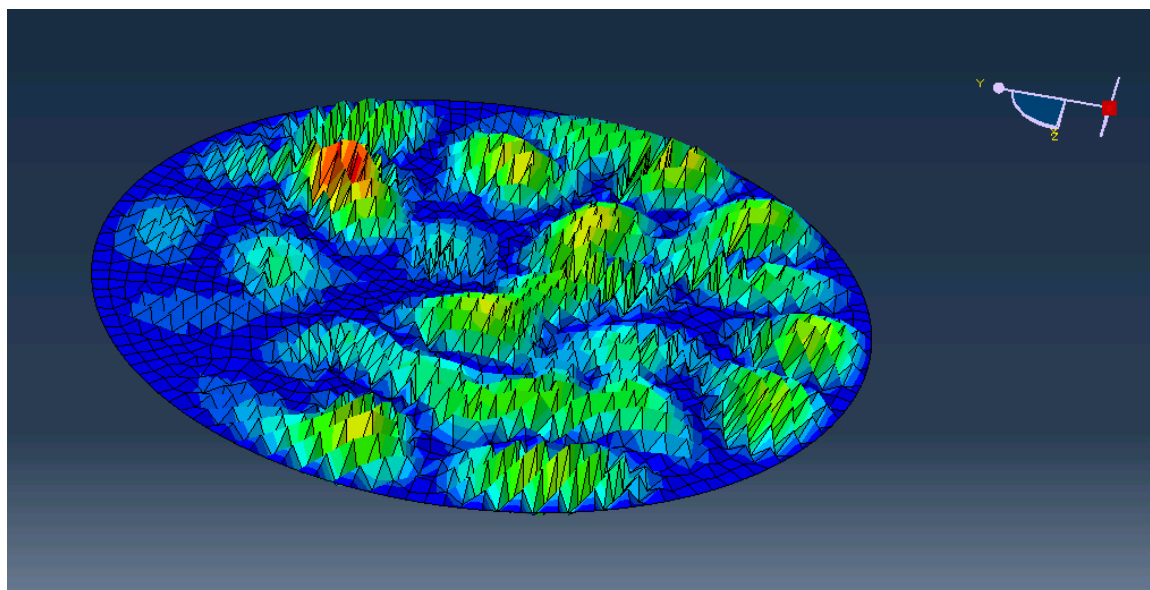
Adelantándome a los resultados, debo indicar que el tamaño de los elementos no hace que varíen los resultados de una manera significativa. Es decir, no vale la pena tener una malla fina, dado que los resultados van a ser prácticamente los mismos. En concreto, los resultados apenas varían un 0,5 por ciento con la malla aconsejada por defecto por Abaqus y con una mucho más fina. De tal manera, que el tamaño global aproximado de cada elemento es de 8 mm al cuadrado. Así, nuestro parche mallado queda de la siguiente manera:



*Imagen 23: Mallado del parche*

Además del tamaño de la malla, hay un aspecto más de la misma que debo destacar. En el entorno de Abaqus dedicado a la malla, además de escoger el tamaño y forma de los elementos, también escogemos el tipo de elemento. En esta ventana de los tipos de elementos es donde debemos indicar dos características especiales de este análisis, mientras que para el resto de opciones dejaremos las que características que aplica Abaqus por defecto.

La primera característica será la de indicar que el elemento es de tipo membrana. Y la segunda será una opción que no se suele usar, pero que para uno de los modos de análisis que emplearemos (que se explicará más adelante) es necesario para que nos den resultados verosímiles, es decir, para evitar perturbaciones en la malla en el momento de la computación de los datos. Para poner un ejemplo, de lo que evitamos al escoger esta opción, se muestra la siguiente imagen, en la que se aprecia la malla completamente perturbada.



*Imagen 24: Perturbación del análisis del parche*

Esta opción es la de no reducir la integración de la malla. Abaqus, por defecto, para ahorrar en coste computacional, reduce las integraciones de la malla. Para entenderlo sencillamente, el programa realiza menos operaciones por cada elemento, dado que en principio el programa interpreta que no necesitará muchos cálculos para resolver el comportamiento de cada elemento. Abaqus por defecto usa una interacción por cada elemento de la malla, sin embargo para este análisis, necesitamos que no se reduzca la integración, de tal manera que Abaqus usará tantos puntos de interacción como lados tenga el elemento, en nuestro caso, cuatro lados implica cuatro interacciones. En este sistema en concreto es preciso no reducir la integración de los elementos para así evitar las perturbaciones, es decir, se necesita realizar la integración completa

. Otra posible solución a este problema de las perturbaciones hubiese sido hacer una malla más fina. Al final, es similar calcular más datos por cada elementos con pocos elementos, que calcular menos datos por elemento pero teniendo muchos elementos.

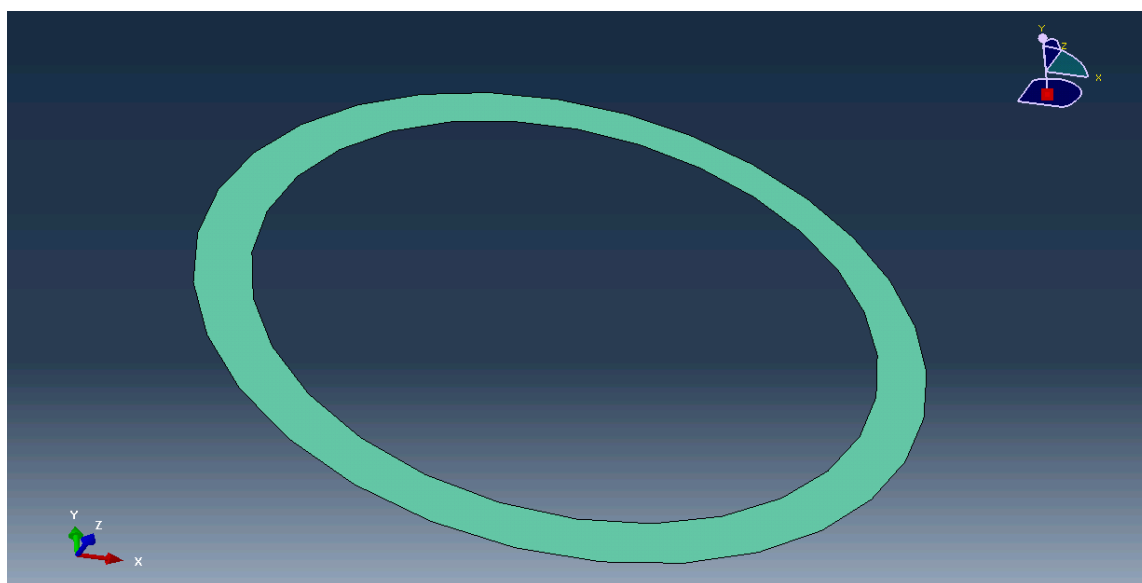
### 3.3 Modelo del conjunto parche más aro

También se van a modelizar ciertos elementos usados actualmente para modificar el sonido que produce la caja. En concreto, los control rings y los moongel. En este apartado comentaré cómo se ha simulado el aro.

En el caso del aro, se ha creado como una part independiente, usando el mismo material y espesor del parche. Las medidas empleadas han sido:

Dimensiones	Radio interior	150 (mm)
	Radio exterior	175 (mm)
	Espesor	0,254 (mm)

*Tabla 5: Datos iniciales del aro quita armónicos*



*Imagen 25: Vista del aro quita armónicos simulado en el Abaqus*

Abaqus también ofrece un entorno dedicado a las interacciones entre diferentes sólidos de un sistema. Es desde aquí desde donde hemos configurado el modo en que el parche y el aro se comportan entre ellos. Lo primero que se ha hecho es colocar las parts de tal manera que queden justo una encima de otra, concéntricamente.

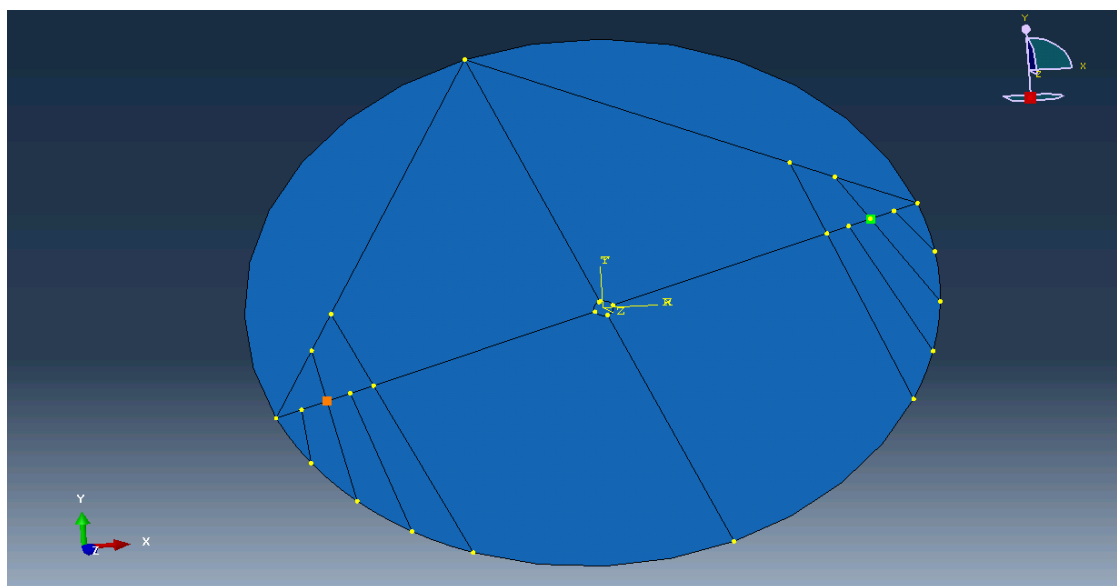
Seguidamente se ha escogido una interacción tipo “tie” entre parche y aro. Además, se ha definido un parámetro de distancia llamado “position tolerance”. Este parámetro define la distancia a partir de la cual los elementos de una y otra part no se consideran unidos de ninguna manera. En nuestro caso se ha definido un valor de 4mm, por tanto, los elementos que estén a más de 4 mm se considerarán independientes.

### 3.4 Modelo del conjunto parche más moongel

Para el caso del Moongel, se ha seguido la misma política que con la baqueta. Es decir, en vez de crear una part independiente y configurar la interacción entre el moongel y el parche, se ha simulado directamente la acción que genera el moongel sobre el parche. Esto ha consistido en colocar unas masas puntuales en el lugar donde se suelen posicionar los moongel.

Al ser masas puntuales, tan solo hay que definir la ubicación del moongel y la masa. Dado que los moongel se colocan con la mano sin emplear métodos de medición ni señales en el parche que indiquen la posición, el moongel puede estar en un lugar en concreto cada vez que se toca. Además de que la masa que tiene el moongel también puede variar de un tipo a otro.

Por tanto, para estudiar adecuadamente este elemento se han creado una serie de particiones simétricas en el parche para así tener varios puntos donde colocar la carga. Estas particiones son auxiliares y no afectan en nada al análisis del parche, tan solo son líneas que se crean en el programa para poder usar los puntos en los que estas líneas se cortan.



*Imagen 27: Vista del parche para el modelo usado para los moongel*

En la imagen anterior se muestran en amarillo todos los puntos donde puedo colocar mi masa puntual. Se han usado las líneas que pasan por el centro que más puntos tienen. Más adelante se explicarán todas las variaciones que se han estudiado en el presente proyecto, entre ellas, esta ubicación de los moongel. La masa de referencia que he empleado es de 50 gramos.



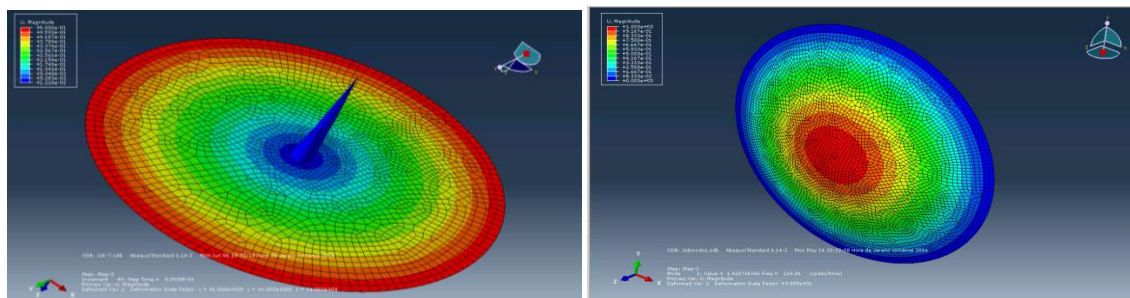
## 3.5 Métodos usados en Abaqus

### 3.5.1 Introducción

Debo recordar que en este análisis hay dos métodos con sus dos modelos dentro de Abaqus claramente diferenciados. Uno de los caminos nos dará los posibles modos de vibración, todas las frecuencias que podría generar el parche. Mientras que por el otro camino sacaremos de Abaqus una gráfica espacio-temporal de un punto del parche para luego usar la operación FFT en Matlab y así sacar el espectro amplitud-frecuencia, es decir, el espectro de sonido que genera el parche tras el golpeo de la baqueta.

Estos dos diferentes modelos de Abaqus compartirán ciertas partes, pero tendrán diferentes tratamientos que se explicarán a continuación. Las principales diferencias residen en la configuración del entorno “step” de Abaqus. En este entorno se escoge el tipo de análisis que realiza Abaqus y cómo van sucediéndose los acontecimientos del sistema.

Un aspecto importante de este análisis común a los dos modelos es una opción que hay que activar en el programa Abaqus. Esta opción se nombra como Nlgeon, y se activa desde el entorno “Step” que se explicará más adelante. Esta opción está desbloqueada por defecto, pero para este análisis es necesario activarla. Nlgeon hace referencia a las grandes deformaciones, es decir, al estar desactivada, el software no acepta grandes deformaciones, las ecuaciones que usa no tienen en cuenta las grandes deformaciones. Si no activamos esta opción, el programa no mostrará la deformación importante del parche, que es la reacción al golpeo de la baqueta en todo el parche. Esto es debido a que la deformación que crea la baqueta hace que toda la superficie del parche se hunda, esta deformación no se considera usando las ecuaciones que usa el programa por defecto, por ello hay que indicar activando la opción Nlgeon que use otras. Abaqus nos mostraría solo la deformación de los elementos cercanos al golpeo de la baqueta, esto sería lo que se muestra en la primera imagen de la pareja que se muestra debajo, mientras lo que realmente ocurre es lo que se aprecia en la segunda imagen:



*Imagen 28: Vistas de la vibración de la frecuencia fundamental con y sin activar la opción Nlgeon en Abaqus*

Otra posibilidad es que directamente el programa no consiga compilar los datos, de error directamente y no nos reporte ningún resultado. Por esta razón, hay que activar la opción Nlgeon en el entorno “step” de cualquier modelo que usemos para este análisis

### 3.5.2 Método modos de vibración

Este modelo Abaqus nos dará como resultados los modos de vibración del parche, es decir, todas las posibles frecuencias que produce el parche. Para este tipo de análisis no se precisan de fuerzas o golpesos, es decir, no tendremos en cuenta la presión que se aplica en el pequeño área central que simula la baqueta; dicho de otro modo, no tendremos en cuenta la baqueta. En este análisis se han creado dos pasos en el entorno “step”.

El paso uno o “step-1” es un paso estático general que dura 0,1 segundos y en el que aparece la deformación. Si recordamos la gráfica de la pretensión del parche, a partir del segundo 0,001 ya está aplicada la totalidad del desplazamiento radial, de tal manera que la pretensión aparece en este step-1 y permanece hasta el final del paso. La pretensión se ha configurado de tal manera que después de este primer step se propague, es decir, se mantenga en el próximo paso. El resto de valores a configurar del step-1 son los que están por defecto.

El paso dos es de tipo “frequency” o frecuencia, dentro de la familia de pasos “linear perturbation” o perturbación lineal. Al configurarlo de esta manera, no dura un tiempo determinado, sino que en los resultados mostrará todos los modos de vibración del parche. Sin embargo, hay dos parámetros dentro del step-2 que se han introducido en vez de dejar los que da por defecto.

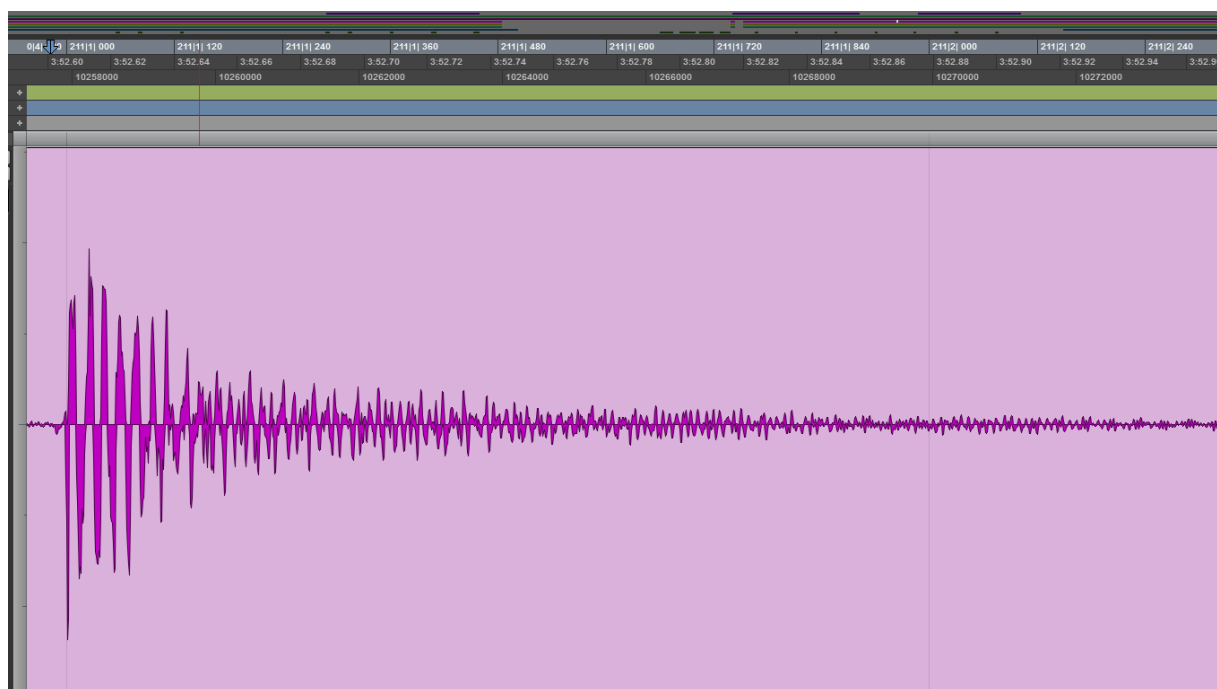
Por un lado, la cantidad de valores que queremos que nos muestre, cuántos modos de vibración queremos saber. Por otro lado, la frecuencia máxima que queremos conocer. Se ha introducido una cantidad de modos de vibración de ochenta, mientras que la frecuencia máxima que queremos que nos muestre es de *20.000 Hz*. Ambos son límites para dejar de calcular modos de vibración, ya adelanto que se alcanza primero la cantidad de ochenta valores de frecuencias, dado que el modo 80 que reporta el análisis tiene una frecuencia menor a *20.000 Hz*.

### 3.5.3 Método pretensión y golpes

A partir de este modelo se reportará una gráfica espacio-temporal de un punto situado en las cercanías del centro del parche. Para este análisis sí que se tiene en cuenta la baqueta. En el entorno step, crearemos también dos pasos. En el entorno Load se configuran la aparición del desplazamiento, deformación o pretensión del parche, y del golpeo de la baqueta.

La pretensión aparece desde el primer step y seguidamente se propaga para seguir actuando a lo largo del segundo step. Mientras que el golpeo de la baqueta aparece en el segundo step. Si recordamos la gráfica del golpeo de la baqueta, la fuerza aparece progresivamente desde el momento inicial del segundo step hasta los 0,001 segundos. En ese momento permanece la presión del golpeo hasta los 0,0015 segundos, y en el 0,002 segundos desaparece la presión.

El primer paso es igual que en el modelo anterior. El step dos es de tipo general, dinámico, implícito. La duración de este step se ha decidido en función de la capacidad computacional y de la realidad. El sonido que genera la caja se disipa a los 0,3 segundos, sin embargo, lo que más se percibe del golpeo, lo que podríamos nombrar como la parte importante del golpeo, dura menos de 0,1 segundos. A continuación se muestra una imagen de la onda de un golpeo sobre la caja usada como referencia. Esta imagen está sacada del programa de producción musical profesional “Pro Tools” y en su parte superior indica el tiempo. Como se puede ver, el golpeo se inicia en el instante 3:52.60, y en el instante 3:52.66 ya solo queda lo que se llama la “cola” del sonido. Así que podríamos analizar tan solo lo que ocurre en los primeros 0,06 segundos, dado que lo que le sigue es una propagación del sonido generado en esas primeras seis centésimas de segundo.



*Imagen 30: Vista de la onda de un solo golpeo en Pro Tools*

Como ya he dicho, el coste computacional también nos condiciona para elegir la duración del golpeo, pues los análisis que he realizado de duración 0,1 segundos me han sido muy costosos de computar, debido a la conexión a internet supongo, pero el hecho es que duraban varias horas en las que no podía haber ningún tipo de problema o interferencia. Además, tras comparar los resultados realizados para más o menos tiempo,

se ha comprobado que los resultados son prácticamente iguales. Por ello, se ha escogido como duración de este segundo step  $0,05$  segundos.

Seguidamente, ha de decidirse cada cuánto tiempo se realizan los cálculos, es decir, qué cantidad de tiempo pasa desde que el programa realiza todas las operaciones pertinentes de todos los elementos hasta que se vuelven a realizar los cálculos. Este intervalo de tiempo debe ser necesariamente menor que la frecuencia de muestreo de la gráfica espacio-temporal que esperamos obtener de este análisis. Es decir, si yo calculo todo cada dos segundos, no puedo sacar un punto de mi gráfica espacio-temporal cada segundo, necesitaré sacarlo cada más de dos segundos.

Como ya comentamos anteriormente, la frecuencia de sampleo para obtener todas las frecuencias audibles debe ser de  $40\text{KHz}$ , al ser la frecuencia, la inversa del tiempo, los datos se deben tomar cada  $1/40.000\text{ Hz} = 2,5 \times 10^{-5}\text{s}$ . Por redondear, se ha escogido  $2 \times 10^{-5}\text{s}$ . Así que, si este es el período de tiempo que necesito calcular un punto de mi gráfica espacio-temporal, los cálculos del programa los deberá hacer cada menos tiempo, por ejemplo, cada  $1 \times 10^{-5}\text{s}$ .

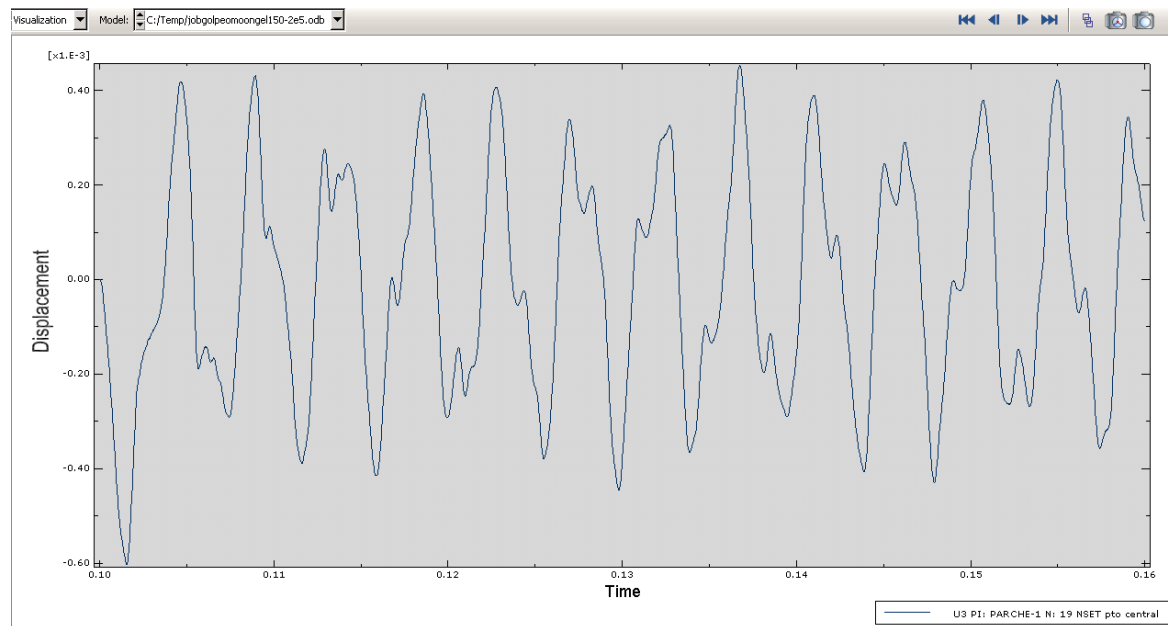
Como ya se ha dicho, se debe configurar antes de comenzar los cálculos, que queremos que calcule el espacio en función del tiempo de uno de los puntos céntricos del parche, y queremos que lo calcule cada  $2 \times 10^{-5}\text{s}$ . El valor  $1 \times 10^{-5}\text{s}$  que se ha escogido hay que tenerlo en cuenta para configurar el step dos.

Después de completar este paso, hay que usar el entorno “job” para compilar los datos. Se tardan alrededor de dos horas en compilar, aun habiendo pedido solo el resultado de la gráfica espacio-temporal y así ahorrar cálculos de energías, u otras deformaciones.

El cálculo de este análisis lo ha realizado el ordenador “mohave” de la Universidad Carlos III sin cuyos recursos y enseñanzas no podría haber realizado tal proyecto. Es un ordenador dedicado a realizar este tipo de cálculos que permite configurar el entorno “job” de Abaqus para que trabaje con los cuatro núcleos de la computadora y así ahorrar más tiempo aún.

Tras estos cálculos, en el entorno “results” sólo tenemos que exportar la gráfica x-y que hemos configurado previamente. Esta gráfica, tendrá un total  $2.500$  puntos dado que, recopilando datos, tenemos que hemos calculado un punto cada  $2 \times 10^{-5}\text{s}$  y el análisis ha durado  $0,05$  segundos:  $0,05\text{s} \times (1 \text{ punto}/2 \times 10^{-5}\text{s}) = 2.500 \text{ puntos}$ .

La gráfica que exportamos vista desde el entorno de “Visualization” de Abaqus es la siguiente:



*Gráfica 6: Desplazamiento sobre el tiempo del punto céntrico del parche sometido a estudio en el segundo método*

## 4. Programa Matlab

Todos estos conocimientos acerca de ondas, frecuencias y el programa de Matlab continuación se los demo agradecer especialmente al futuro Doctor Guillermo Bielsa, un compañero de la Carlos III que no dudo en prestarme ayuda cuando lo necesité.

En esta parte del presente proyecto se explicará el programa introducido en Matlab que trabajará los puntos que se obtendrán del programa Abaqus realizando la transformada de Fourier y mostrándonos el espectro de sonido en un eje de amplitud-frecuencia (Hz), y saber por tanto el sonido del parche.

Los datos se exportan de Abaqus en un archivo .rpt legible por el bloc de notas. Seguidamente los he introducido al Excel para tener dos columnas de puntos reconocibles por Matlab directamente. Por último, se ha nombrado en Matlab las columnas de puntos, es decir, la coordenada x que contiene la información del tiempo en el que se ha tomado la posición de los puntos estará en la columna “eje\_tiempo”. Y la columna “eje\_datos” contendrá la información del eje y de la gráfica espacio-temporal, es decir, la información del espacio, la coordenada Z del punto analizado, en el momento marcado por la coordenada “x”. A continuación se muestra este proceso de introducción de datos y una imagen en la que se aprecia cómo está colocado el eje Z en función del parche.

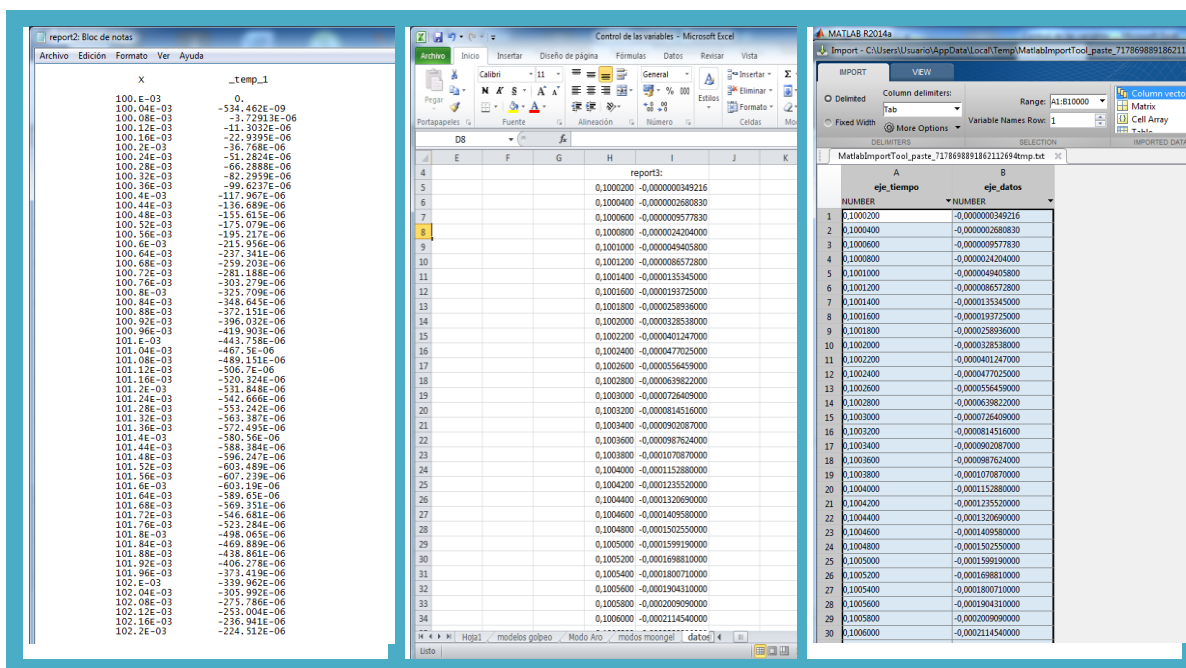
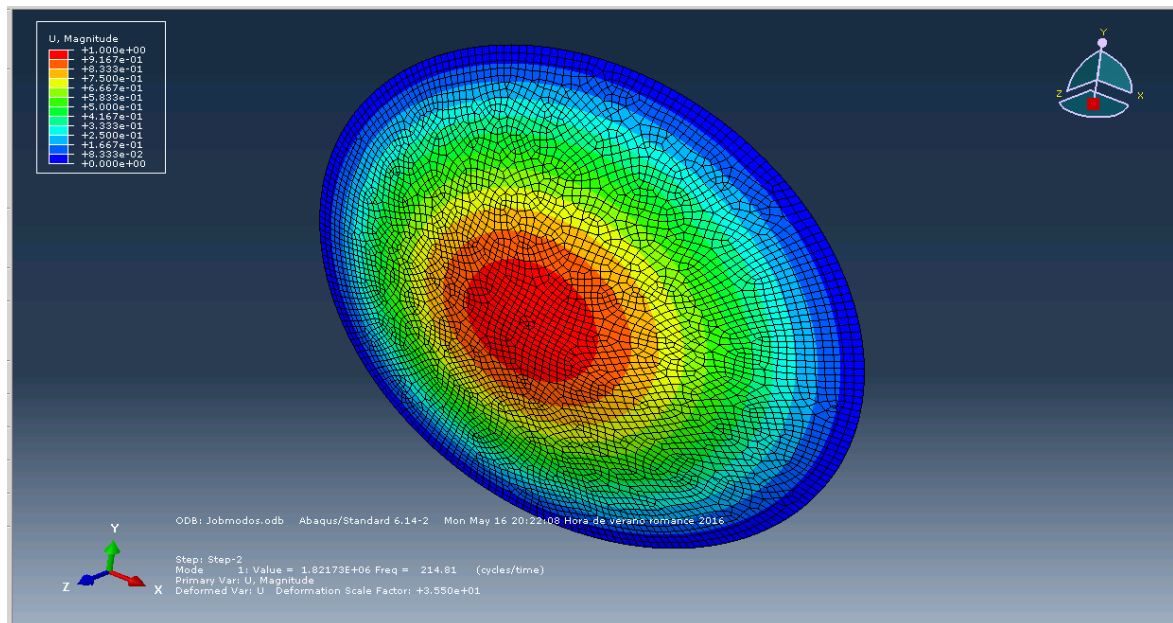


Tabla 6: Desarrollo de los datos de la gráfica espacio temporal, a lo largo de los programas usados hasta introducirlos en Matlab





*Imagen 31: Vibración correspondiente a la frecuencia fundamental del parche*

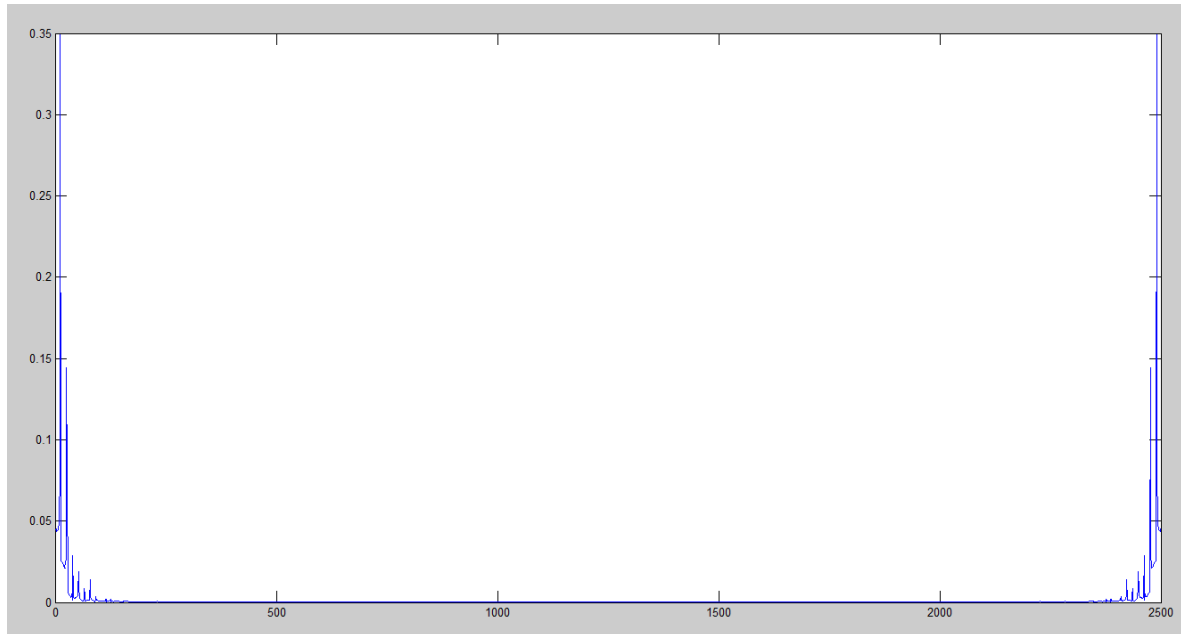
Antes de ver el código empleado se deben entender unos conceptos claros que así queden expuestos los detalles de esta parte.

Por un lado, hay que entender que la operación FFT de Matlab nos dará el resultado en números complejos a no ser que lo programemos para que nos muestre el valor absoluto de los resultados. Para esto, basta con añadir “abs( )” escribiendo dentro de los paréntesis la gráfica que se quiere mostrar.

Por otro lado, hay que definir la longitud del eje x de la gráfica amplitud-frecuencia, es decir, el eje de la frecuencia. Esto es debido a que la FFT solo procesa los datos del espacio, y deberemos ser nosotros quienes “coloquemos” el eje de frecuencia de tal manera que nos den las frecuencias correctas. Para esto es para lo que usaremos el teorema de Nyquist-Shannon.

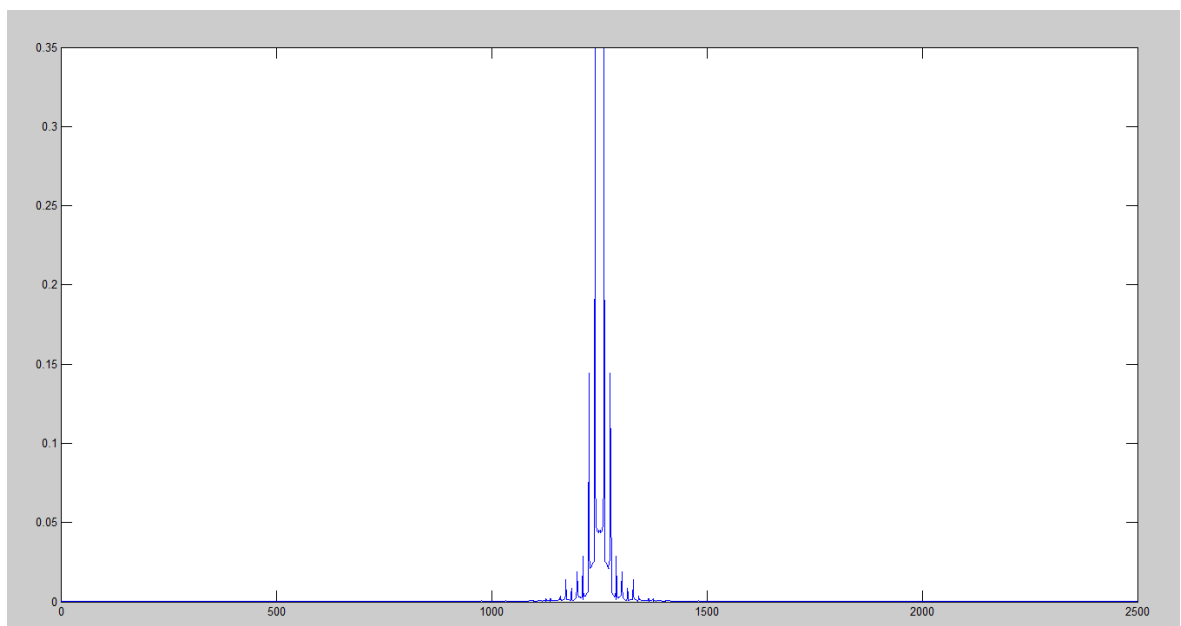
Primeramente, este parámetro, para una fft se nombra “size fft” o tamaño de la fft, que en nuestro caso le daremos el valor del total de puntos que tenemos, es decir, 2.500. Sin embargo, si lo dejásemos así, la gráfica no saldría sobre el eje correcto, nos daría valores erróneos de frecuencia. La gráfica se mostraría de esta manera:





*Gráfica 7: Primera vista de la FFT reportada por Matlab*

Como se puede apreciar, aún hay que tratarla para que nos muestre lo que realmente queremos. Seguidamente se usa la operación de Matlab nombrada “fftshift” usada para colocar la gráfica donde debe estar, tal cual se muestra en la figura:



*Gráfica 8: Segunda vista de la FFT reportada por Matlab, fftshift*

Como vemos, por un lado debemos de dividir la FFT, es decir, se aprecian dos FFT simétricas, cuando tan solo nos interesa ver la imagen de una de ellas. Y por otro lado el eje no corresponde al eje matemáticamente correcto. Primero se explicará cómo conseguir el eje.

Para colocar el eje de frecuencia correctamente debemos usar el teorema de Nyquist-Shannon que se ha explicado anteriormente. Las operaciones que se realizan dentro del programa basándonos en este teorema se basan primeramente en saber qué frecuencia estamos cubriendo con los datos de tiempo introducidos, es decir, el ancho de banda, “bandwidth” o BW. Y a partir de este dato, tendremos que cuadrar el eje de frecuencia anterior de o BW con el que hemos usado al comienzo o size fft.

La operación que realiza para calcular el ancho de banda es la siguiente:

```
BW = 1/(2*(eje_tiempo(2)-eje_tiempo(1)));
```

Siendo el  $((\text{eje\_tiempo}(2) - \text{eje\_tiempo}(1)) = 0,10004 - 0,10006 = 2 \times 10^{-5} \text{s}$ , es decir, nuestra frecuencia de muestreo, que según Nyquist, es el doble de la frecuencia máxima que queremos mostrar, es decir, que el ancho de banda, y de ahí ese  $2^*$ . Seguidamente, se pasa el ancho de banda de segundos a hercios haciendo la inversa.

La operación que realiza el programa para calcular el eje de frecuencia correcto es:

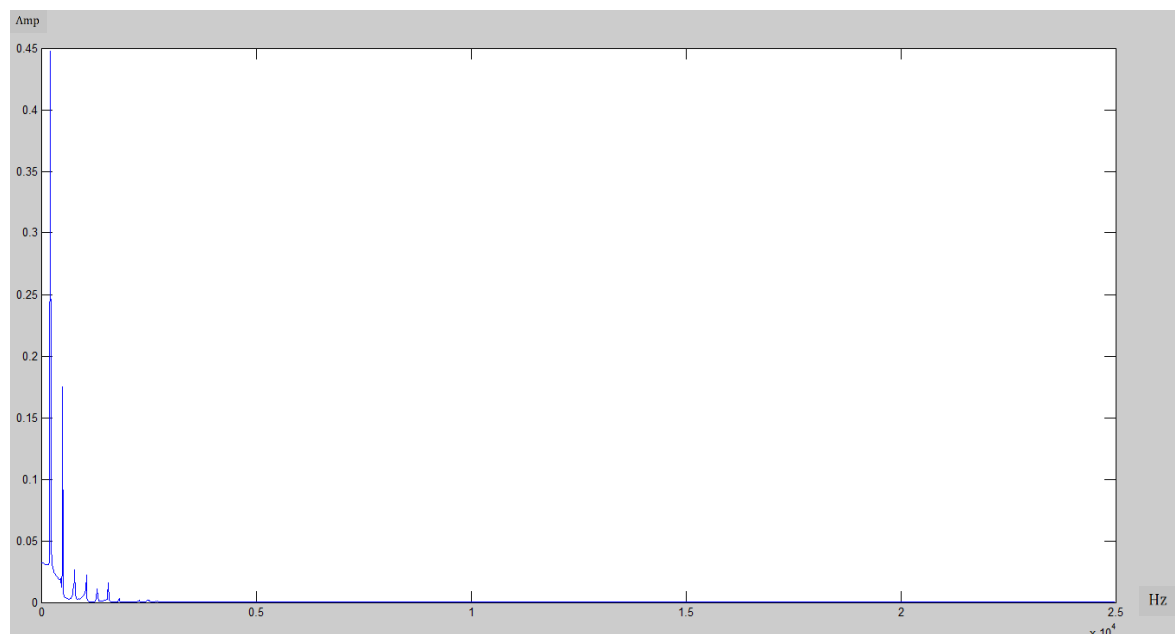
```
eje_frecuencia = 1:2*(BW/size_fft):BW
```

La manera de nombrar un eje en el lenguaje de programación de Matlab consiste en introducir después del igual el primer valor de la gráfica, seguidamente el intervalo en el que se sucede la gráfica y seguidamente el límite de la gráfica.

Además, aun teníamos el problema de que la fftshift nos reporta dos fft simétricas. Con el mismo lenguaje de programación explicado en el párrafo anterior, se ha escrito la siguiente línea de código:

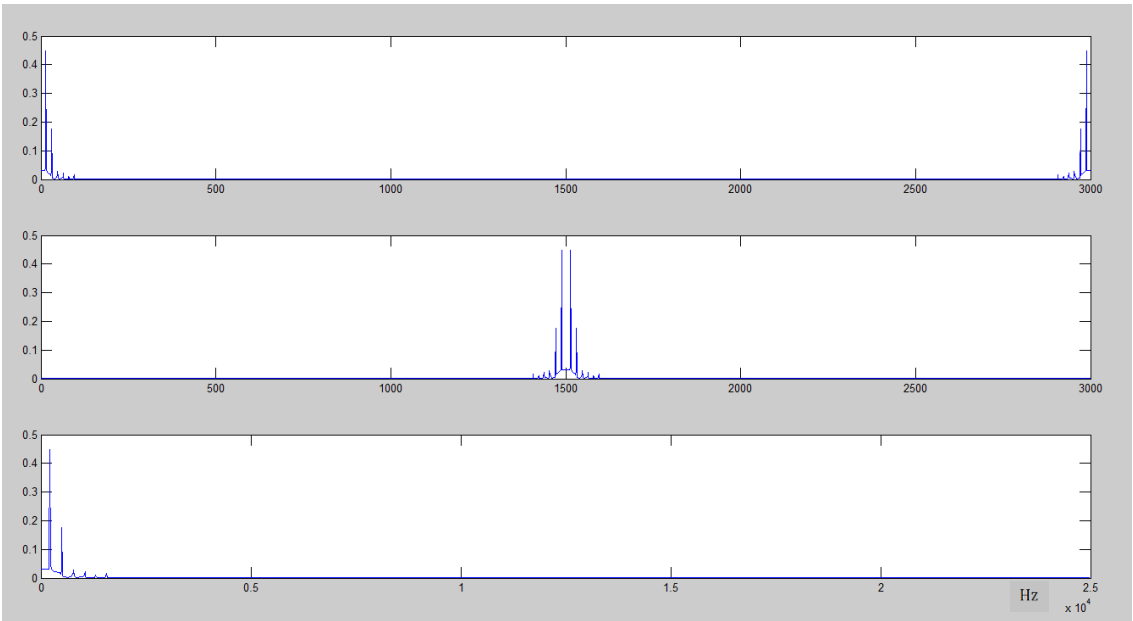
```
freq_dom = freq_dom_aux2((size_fft*0.5)+1:end);
```

Tras seguir estos pasos la imagen que nos reporta el programa es definitivamente el espectro de sonido:



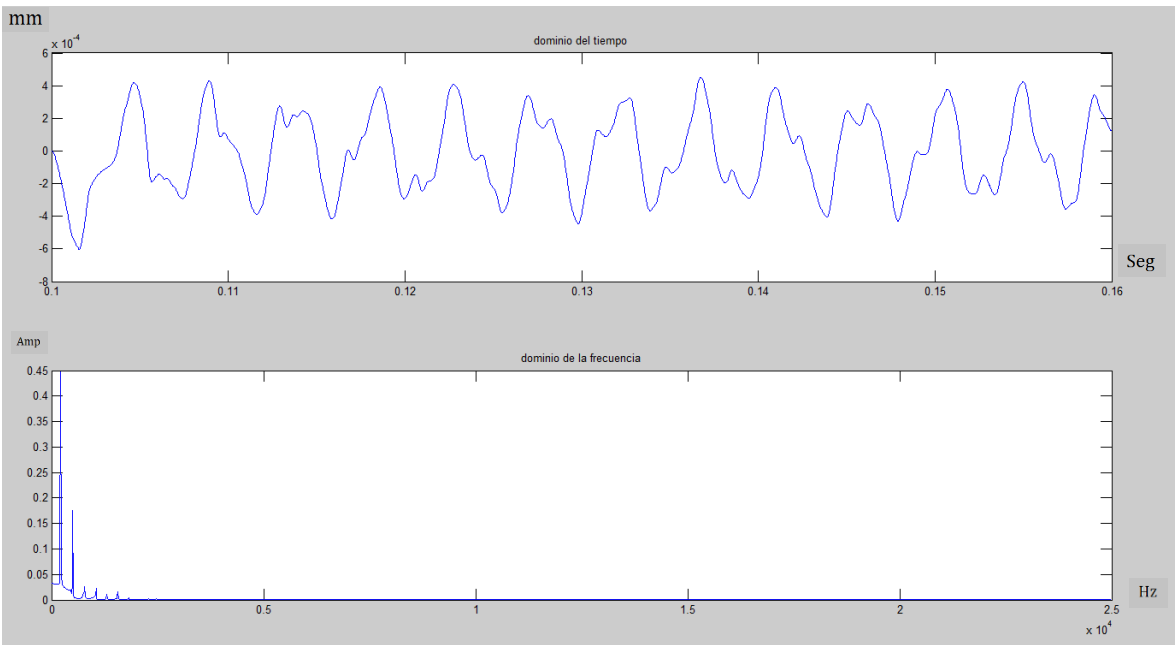
*Espectro de sonido 4: Golpeo estándar sobre el parche*

El resto de operaciones que tiene el programa sirven para reportar dos imágenes diferentes. En la primera se aprecia el progreso que ha sufrido la FFT para conseguir dar el espectro de sonido. Esta imagen se presenta a continuación:



*Tabla 7: Desarrollo de la FFT en Matlab*

La segunda imagen muestra la gráfica espacio-temporal de la que se parte y la gráfica del espectro de sonido que se consigue a partir de la anterior:



*Tabla 8: Vista de la gráfica espacio temporal de partida y del espectro de sonido que se obtiene de ella*

A continuación se muestra las líneas de código que se han usado en el programa creado:

```
%% Dominio del tiempo
%Creamos figura y dibujamos la oscilacion VS el tiempo
figure()
subplot(2,1,1)
plot(eje_tiempo,eje_datos)
title('dominio del tiempo')

%% Dominio de la frecuencia
%Ancho de banda y tamaño de fft
% Ancho de banda = 2*frecuencia de sampleo (criterio Nyquist)
BW = 1/(2*(eje_tiempo(2)-eje_tiempo(1)));
size_fft = length(eje_datos);

%Hacemos fft

freq_dom_aux1 = fft(eje_datos,size_fft);
freq_dom_aux2 = fftshift(freq_dom_aux1);
eje_frecuencia = 1:2*(BW/size_fft):BW;
freq_dom = freq_dom_aux2((size_fft*0.5)+1:end);
subplot(2,1,2)
plot(eje_frecuencia,abs(freq_dom))
title('dominio de la frecuencia')

%Dibujamos los 3 pasos de la fft
figure()
subplot(3,1,1)
plot(abs(freq_dom_aux1))
subplot(3,1,2)
plot(abs(freq_dom_aux2))
subplot(3,1,3)
plot(eje_frecuencia,abs(freq_dom))
```

Se debe entender que el eje de amplitud no tiene unidades claras y certeras, sino que dependen de los datos introducidos. Además, este dato hace referencia al nivel de dB con el que va a sonar el parche. Sencillamente, este valor no resulta interesante. El volumen de la batería se regula por medio de los micrófonos que se usan para recoger el sonido de esta. Tan solo en los locales de ensayo se trabaja sin micrófonos, y aquí todos los instrumentos se regulan el volumen en función de la batería. Si el volumen de una batería en un local de ensayo es más elevado que otra, los demás músicos se regularan sin mayor complicación. Por ello, en los espectros de sonido que se muestran en el eje Y se indica “Amp” pero no unidades, dado que no nos interesan.

Sin embargo, este eje de amplitud resulta muy interesante como reflejo de las relaciones de amplitudes entre las diferentes frecuencias de un golpeo. Así, podemos saber qué pico de frecuencia suena más con respecto a los demás. Esto nos dará mucha información del sonido que se producirá.

## 5. Datos iniciales

Dimensiones del parche	Radio	177 mm
	Espesor	0,254 mm
Propiedades mecánicas del Mylar	Mod, Young	3400 Mpa
	Poisson	0,3
	Densidad	1,38e-9 Tn/mm <sup>3</sup>
Cargas	Ubicación del centro del golpeo	Centro del parche
	Desplazamiento radial	0,5 mm
	Radio del área de golpeo	0,5 mm
	Presión máxima del golpeo	50 Pa
Moongel	Ubicación desde el centro del parche	150 mm
	Masa del Moongel	5e-5 Tn
Control Ring	Radio interior	150 mm
	Radio exterior	175 mm
	Espesor	0,254 mm
	Material	Mylar

Tabla 9: Datos iniciales del análisis

## 6. Variaciones realizadas

A continuación se explican las variaciones que se han realizado para obtener los resultados. Por un lado, hay que comprender que del primer camino del que obtenemos solo los modos de frecuencia no obtenemos ninguna referencia acerca de la amplitud, sin embargo, este método es más rápido y lleva mucho menos tiempo estudiar muchas variaciones. Sin embargo, el otro método no exporta una gráfica en la que se puede apreciar la amplitud y por tanto se puede analizar también este parámetro. Pero, debido al tiempo, no se pueden realizar todas las variaciones posibles de esta manera.

Este análisis se puede extender enormemente, es decir, podríamos estudiar cualquier tipo de variación o golpeo que se le aplique al parche para sacar el espectro de frecuencia. Debido a esto, he necesitado marcar un límite a las variaciones para poder dar fin al proyecto.

Se ha intentado realizar variaciones de todos los datos iniciales, aunque no todos me parecían interesantes, dado que, por ejemplo, el radio del área de golpeo no varía demasiado de unas baquetas estándar a otras, tendríamos que irnos a casos especiales poco frecuentes o a otros instrumentos para encontrarnos otras baquetas de dimensiones significativamente diferentes.

En el caso de los materiales, no tiene sentido variar las propiedades sin tener en cuenta los materiales existentes. Este proyecto, podría ser usado para probar otros materiales, y saber qué dimensiones, tensado, localización óptima del golpeo y demás variables; serían preferibles en función del sonido que esperamos conseguir. Sin embargo, actualmente, al ser los parches casi siempre del mismo material, el Mylar, tan solo se ha analizado el Kevlar. Sería interesante tener las propiedades de ciertos materiales orgánicos usados, como pieles, pero las propiedades mecánicas de este tipo de materiales son muy costosas de conseguir, y yo he sido incapaz de encontrarlas a pesar de los recursos de los que dispongo. Además, si hablamos de otro material diferente al Mylar, nos tendríamos que ir a casos exageradamente especiales o a otros instrumentos que no sean la caja. Las propiedades del Kevlar son muy similares a las del Mylar, pues ambos son materiales orgánicos. Lo único que varía en este caso es la densidad.

Propiedades del Kevlar:	Mod. Young	3400 (Mpa)
	Coeficiente de Poisson	0,3
	Densidad	1,44E-09 (Tn/mm <sup>3</sup> )

*Tabla 10: Propiedades mecánicas del Kevlar*

Hay otro dato que no se ha analizado su variación completamente, este es el espesor. Adelantándonos a los resultados, la variación del espesor del parche no varía las frecuencias. Es decir, los resultados obtenidos en el primer camino del análisis al variar el espesor, eran siempre iguales. Esto hace que carezca de interés estudiar la variación de este dato.

Por ello, los datos que se han variado y más se han analizado han sido: el Radio del parche, la ubicación del golpeo, el desplazamiento radial y la presión máxima del golpeo. Empecemos explicando cómo se ha variado el radio del parche.

Los parches de las cajas son muy variados, pero hay dimensiones exactas, medidas en pulgadas, que son típicas. Además, el análisis, puede ser extendido al de los timbales que se colocan en la batería. Esto es debido a que la estructura de los timbales y el de la caja es igual, quitando la bordonera. Así, al variar el radio del parche, si lo reduzco al tamaño del parche típico de un timbal, realmente estoy analizando un timbal. Por tanto, se ha analizado con el segundo método, el del espectro de sonido, solo una variación del radio, para ver el espectro de sonido de un timbal.

Sin embargo, si se agranda el radio del parche, hasta el radio típico de los bombos, no estaríamos hablando de la misma similitud exacta, pues los bombos no se golpean con las baquetas, sino con unas mazas acolchadas por medio de un mecanismo que acciona el pie. Por ello, no tiene sentido sacar el espectro de sonido entero por el segundo camino o método. Pero el golpeo no afecta a las frecuencias con las que se excita el parche, así que, el primer camino sí que tendría sentido hacerlo, en el que solo se tienen en cuenta las frecuencias con las que suena.

Así, las variaciones que se han realizado en el método de obtener los modos de frecuencia, se muestran en una tabla a continuación:

Instrumento típico con este radio de parche	Diámetro en pulgadas aproximado	Diámetro en milímetros aproximados
Timbal 1	10,00	127,00
Timbal 2 y Caja	12,00	152,00
Caja	14,00	177,00
Caja	15,00	190,00
Bombo	16,00	200,00
Bombo	18,00	228,00
Bombo	20,00	254,00
Bombo	22,00	280,00

*Tabla 11: Variaciones realizadas del radio del parche*



En cuanto a los factores que se varían en el entorno “load” de Abaqus, los que se refieren a las cargas, hay que recordar que el golpeo solo se tiene en cuenta en el segundo camino, es decir, el análisis que nos muestra el espectro de sonido del parche. Debido a esto, las variaciones en cuanto a la ubicación del golpeo y la presión de golpeo solo se podrán analizar en el segundo camino, obteniendo los espectros de sonido. Mientras que la deformación, desplazamiento, pretensión o tensado del parche; se ha estudiado extensamente con el primer camino, analizando cómo varían las frecuencias que suenan en función de este parámetro, pero no se ha estudiado a fondo su espectro de sonido. Este segundo método se ha usado mucho más extensamente en la variación del golpeo.

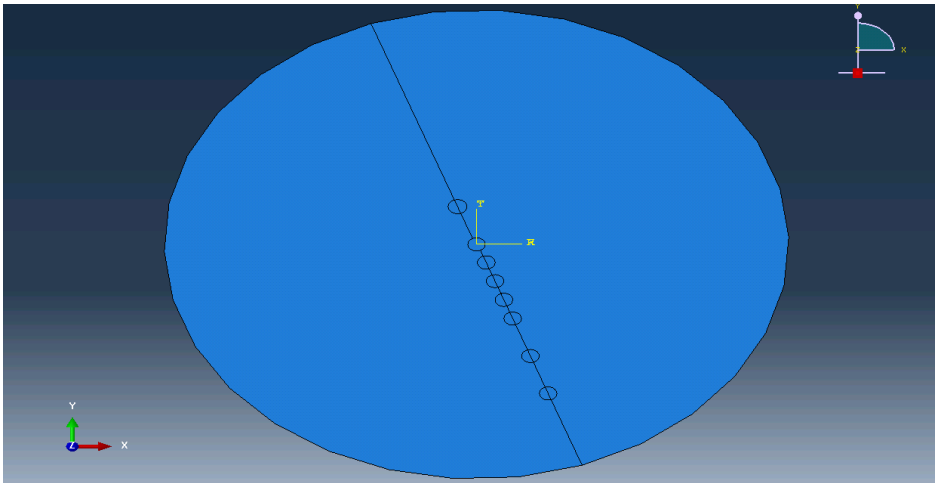
Por este motivo, se ha analizado el espectro de sonido solo con dos valores diferentes al inicial, desplazamientos de  $0,3\text{ mm}$  y de  $0,7\text{ mm}$ . Mientras que para el primer método, se han realizado más variaciones. Mostraré qué variaciones se han realizado respecto a la pretensión para el análisis de sus frecuencias:

Desplazamiento radial (mm)	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
----------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

*Tabla 12: Variaciones realizadas de la pretensión del parche*

En cuanto a la presión de golpeo, como ya dijimos, solo tiene sentido estudiarla desde el segundo método para sacar la relación de amplitudes que existe al golpear más flojo o más fuerte, pero las frecuencias serán las mismas. Al ser este segundo método más lento, no se han realizado tantas variaciones, en concreto,  $5$ ,  $10$  y  $25\text{ Pa}$ , además de la inicial de  $50\text{ Pa}$ .

En cuanto a la ubicación del centro del área de golpeo, se ha realizado un modelo especial dentro de Abaqus, para poder variar el golpeo, de tal manera que el parche nos quedará de esta manera:



*Imagen 32: Vista del parche creado para el modelo de las variaciones de la ubicación del golpeo*

Como se puede apreciar, aparecen diferentes superficies circulares a lo largo del parche, donde se irá colocando la presión inicial máxima para ver cómo varía el espectro de frecuencia en función de esta variación. Esto simulará lo que sucede si el músico percusionista golpea en otro lado que no sea el centro. Estos centros están situados de la siguiente manera:

Desplazamiento del centro del golpeo	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm	90 mm	120 mm
--------------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	--------

*Tabla 13: Variaciones realizadas del desplazamiento del centro del golpeo*

En cuanto a los elementos quita armónicos, tan solo se han estudiado por el segundo método, dado que, por un lado el aro no varía las frecuencias, y por otro lado, el moongel las varía de manera no significativa. Además, estos elementos intentan, precisamente, variar la relación que hay entre la frecuencia fundamental y sus armónicos, para que el sonido tenga menos armónicos, y suene más compacto y rotundo.

Las variaciones que se han realizado son principalmente con el Moongel. Como ya vimos en una imagen anterior, el parche se ha diseñado especialmente para poder situar el Moongel donde queramos. En él, se han colocado una serie de puntos para poder analizar. Los puntos donde se ha colocado la masa que simula el moongel están situados a 125 mm y a 150 mm del centro. Además, también se ha probado con dos masas diferentes, una de 20 gramos, y la llamada como inicial de 50 gramos.

Estas serían todas las variaciones que se han realizado para estudiar el comportamiento del sonido del parche en función de las variables que componen la acción del golpeo en el conjunto baqueta-caja.

## 7. Resultados

### 7.1 Métodos usados en Abaqus

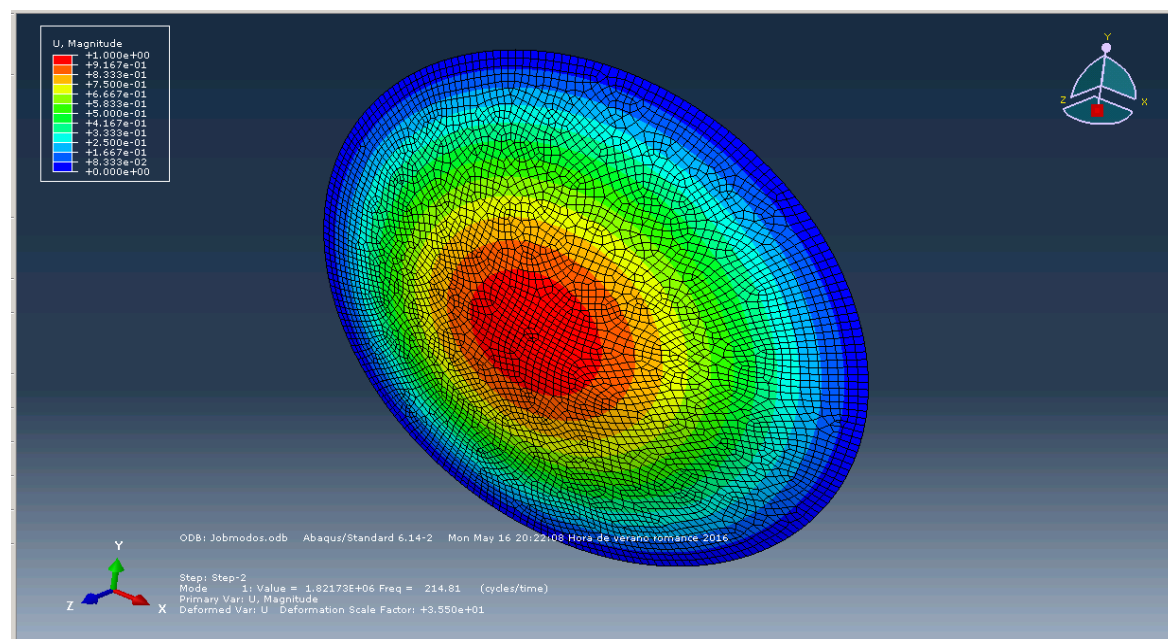
#### 7.1.1 Introducción

En este apartado de resultados se van a presentar los resultados que se han obtenido del modelo, mostrando imágenes de cómo vibra el parche, del espectro de sonido, tablas de datos y gráficas conseguidas a partir de los datos. En función de qué se está analizando, se usará el primero o el segundo camino. Primeramente se mostrarán los resultados con los datos iniciales de ambos métodos y se contrastarán los resultados.

#### 7.1.2 Método modos de vibración

Este modelo se ha creado usando el primer método, es decir, nos reportará todos los modos de frecuencia que tiene el parche. Se han usado los datos iniciales. Primeramente se mostrará el primer modo, que es la frecuencia fundamental del parche:

Modo 1: 214,81 Hz:

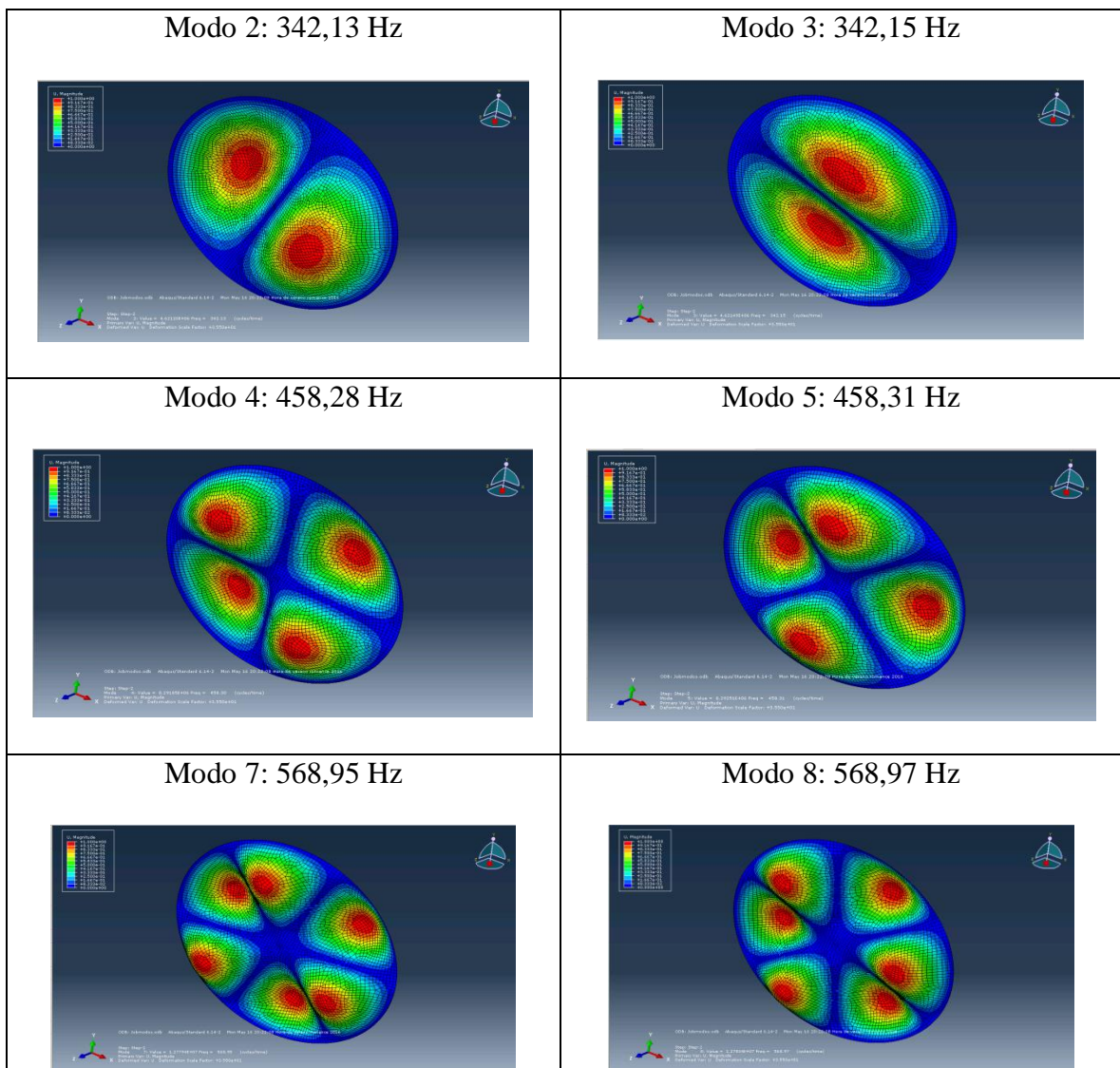


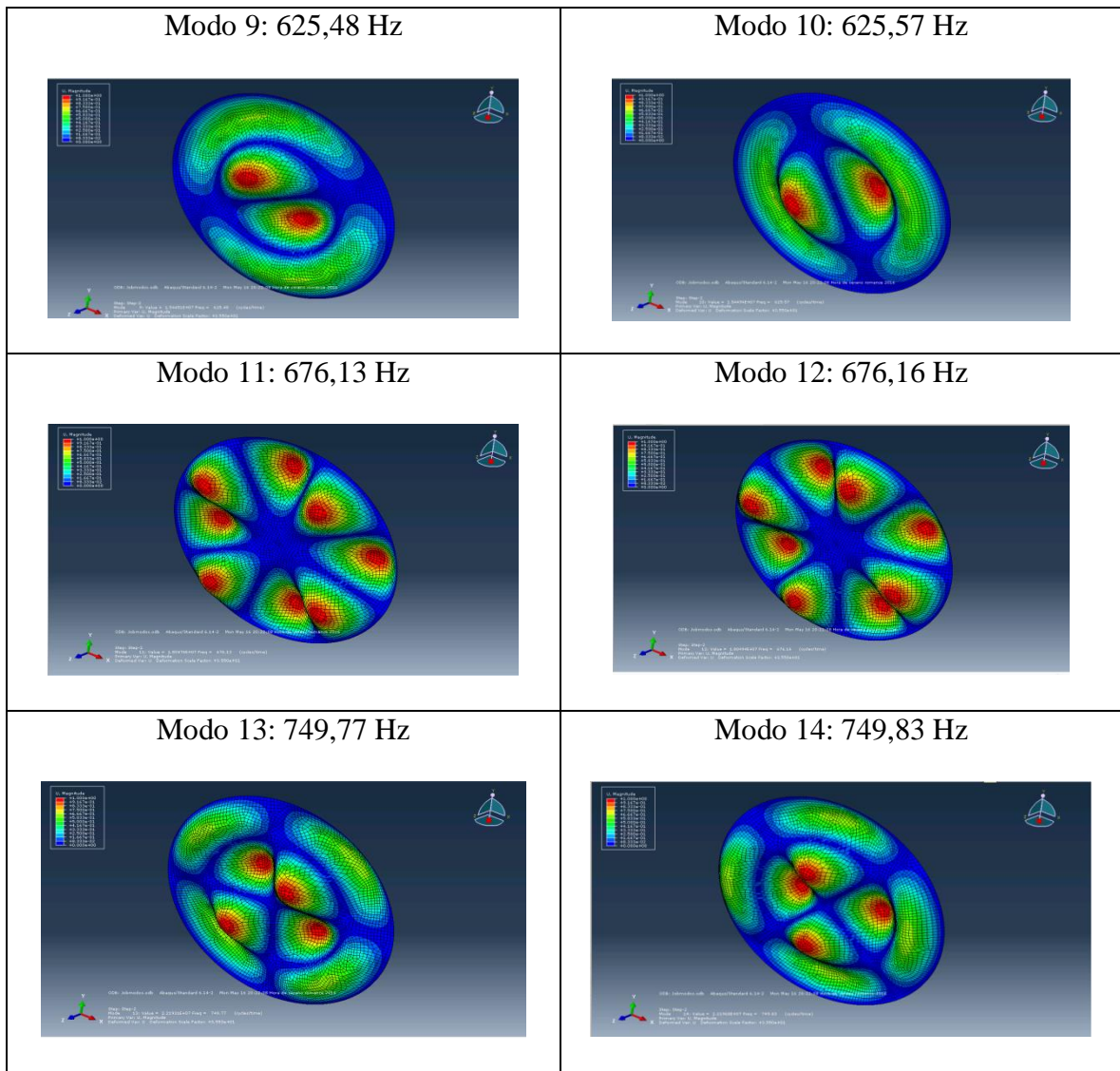
*Imagen 31: Vibración correspondiente a la frecuencia fundamental del parche*

A continuación se muestran los modos de vibración que se han obtenido, que representan todos los posibles armónicos de la caja. Se muestran numerados según el orden creciente de frecuencias, con la frecuencia correspondiente, hasta el modo 14, exceptuando el modo 6. A partir de ahí se muestran solo los modos axilsimétricos, es decir, que son simétricos alrededor del eje Z. El modo 6 se muestra aquí. Esto es debido

a que los modos que no son axilsimétricos se muestran cada vez más montañas y valles, y ya se explicará al mostrar el espectro de sonido, que no tienen tanta importancia como los axilsimétricos, por eso se separan.

Se debe indicar, que para este primer análisis no se usó la opción de reducción de integración, por eso me salían muchos modos perturbados y la numeración no es la correcta, no lleva el orden real. Sin embargo, es una manera de nombrarlos, y cumple esa función. A pesar de ello, para sacar más modos de frecuencia que no tuviesen perturbaciones, se disminuyó el tamaño de los elementos y de esta manera me salieron más modos axilsimétricos sin perturbaciones, aunque al tener menos perturbaciones, en global aparecen menos modos perturbados, es decir, irreales; y por tanto la numeración es distinta del análisis con una malla y otra.





*Tabla 14: Modos de frecuencia no axilsimétricos*

Es interesante ver cómo los modos van en parejas, es decir, se disponen por parejas, parejas que son simétricas y por ello tienen prácticamente las mismas frecuencias. De hecho, a nivel práctico se cuenta como que tienen la misma frecuencia, dado que es lo que ocurriría en la realidad. También es interesante concluir que a más frecuencia, las montañas o valles son cada vez más pequeños. Esto encaja con otros instrumentos, en los que al reducir la longitud del elemento vibrante, el sonido es más agudo, suceso que ocurre al moverte en el mástil de una guitarra. Mientras que el modo más grave es el que crea una onda o vibración más grande en el parche.

A continuación se presentan los modos axilsimétricos. La numeración sirve solo para nombrarlos y que se han usado dos mallas diferentes. Los resultados para ambas mallas son iguales, lo único, que con la malla más fina no se aprecian tan bien las ondulaciones, pero llega un momento en que era necesario dicha malla para sacar los modos sin perturbaciones.



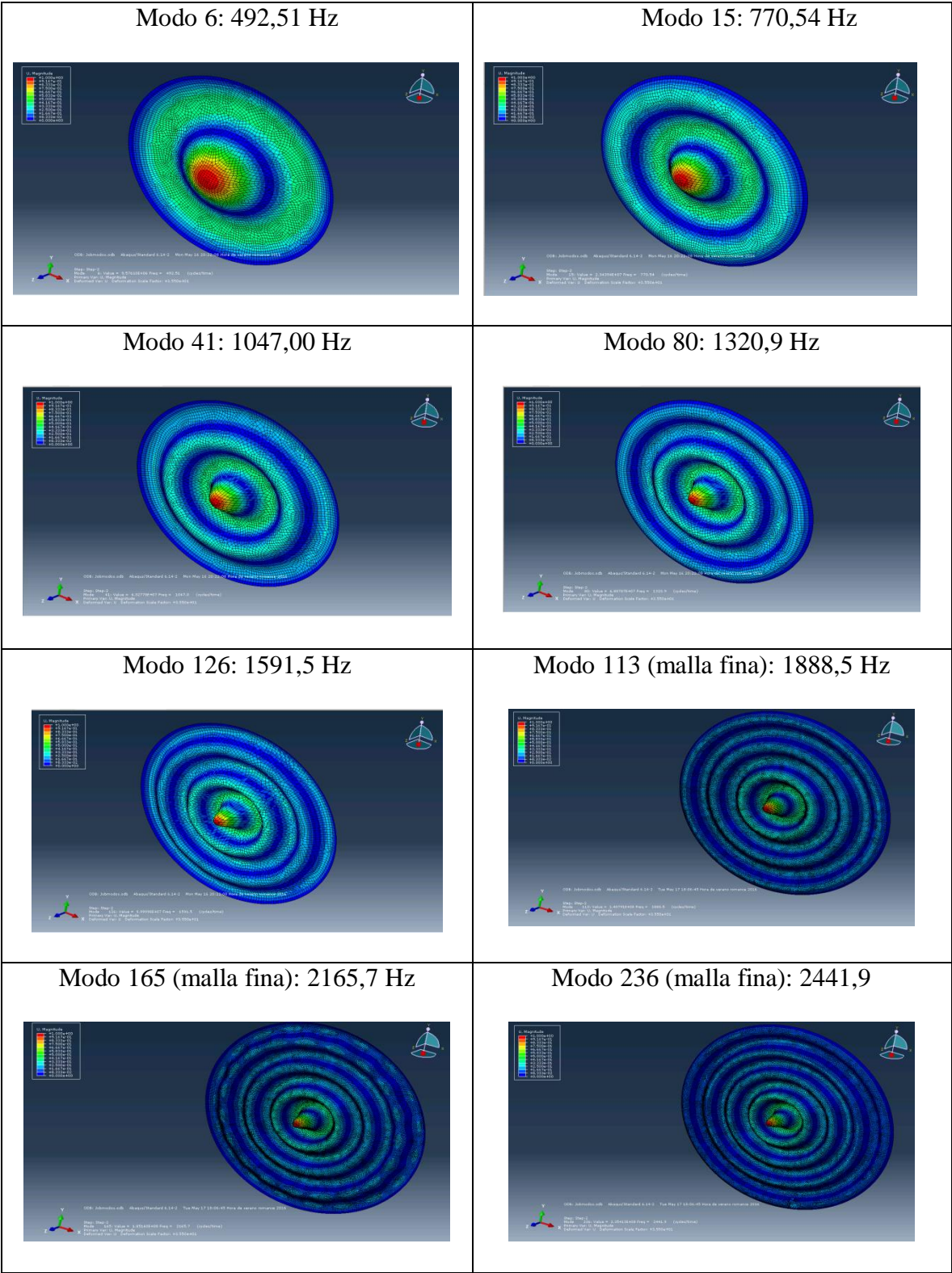
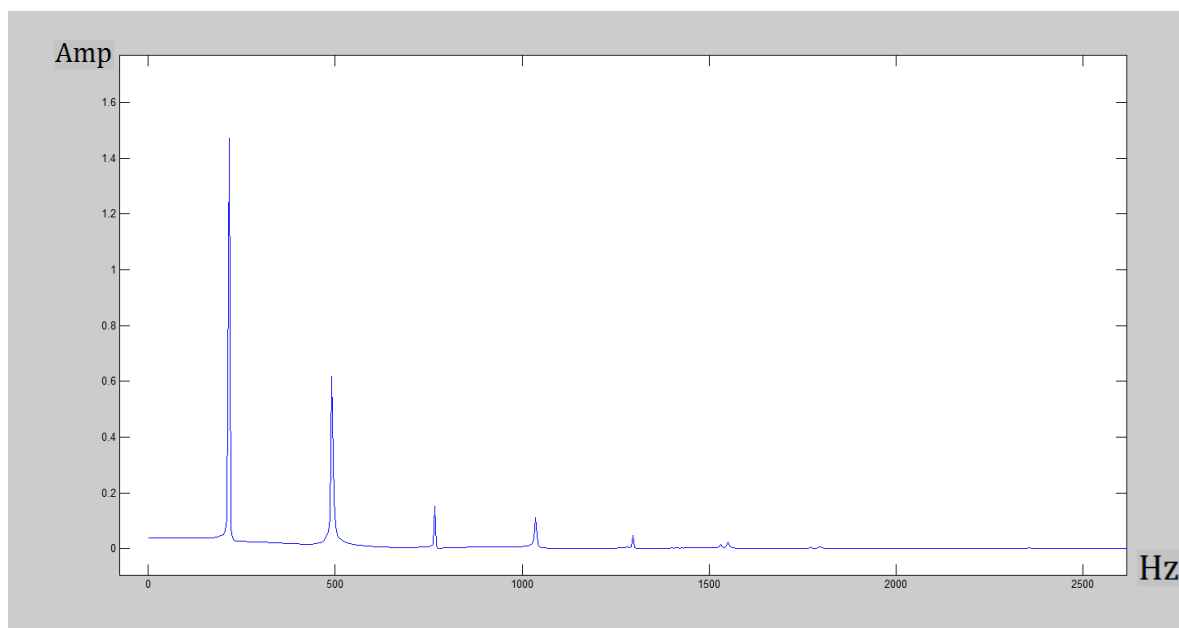


Tabla 15: Modos de frecuencia axilsimétricos

Se puede ver cómo estos modos van siguiendo una progresión, similar a las ondas que se crean al tirar una piedra en un lago.

### 7.1.3 Método pretensión y golpes

En este apartado se va a presentar el espectro de sonido de la caja en cuestión, sacada de un estudio especial que se ha hecho, que dura más, especialmente, para tener en cuenta el sonido completo de la caja, desde que comienza el golpeo hasta que está casi apagado. Este tiempo se ha aumentado de  $0,05s$  a  $0,2s$ , por tanto tiene un total de *10.000 puntos*. De estos puntos se obtiene el siguiente espectro de frecuencia:



*Espectro de sonido 4: Golpeo estándar sobre el parche*

Los resultados que nos han salido en este método han sido especialmente interesantes porque tenemos la amplitud. Dicha amplitud no se ha estudiado a fondo, dado que hace referencia al volumen con el que se va a escuchar la música, y entra en juego el reproductor de música, la sala, las curvas isofónicas... Sin embargo, sí que nos es interesante conocer las relaciones de amplitud entre unos modos y otros de variación, y poder compararlos de unos datos a otros, pero el valor numérico en sí no es demasiado interesante.

Dependiendo del tiempo de duración del step-2, tendremos un eje de amplitud u otro, y lamentablemente, no he empleado siempre el mismo tiempo. Sin embargo, aunque tarde, me di cuenta de este hecho y he podido realizar algún análisis más para poder comparar las variaciones realizadas sobre la misma gráfica en casi todos los casos.

### 7.1.4 Contrastación de los resultados

Ambos métodos son bastante independientes, por tanto, esta contrastación de datos es importante para conocer qué es lo que realmente está ocurriendo. Matlab nos da la opción de posicionarnos sobre los puntos de la gráfica para conocer numéricamente la frecuencia de los picos de frecuencia, es decir, de los armónicos y de la frecuencia fundamental, que es el pico más alto que tenemos en el espectro de sonido. Tras sacar la frecuencia de todos los puntos, se han obtenido las siguientes frecuencias:

Frecuencia en Hz:	216	491	766	1036	1296	1531	1551	1771	1796
-------------------	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------

*Tabla 16: Frecuencias excitadas tras el golpeo*

Como se aprecia en la imagen y en la tabla de puntos, los armónicos que aparecen a partir de 1500 Hz se presentan en parejas. Aunque no estoy claro de que realmente sea así, o simplemente sean perturbaciones y realmente haya solo un pico en torno a esas frecuencias.

Si comparamos estas frecuencias sacadas del segundo método con las que sacamos del primer método, nos daremos cuenta de que las frecuencias que muestra el espectro coinciden casi perfectamente con los modos axilimétricos. Por eso los separé de los demás modos de vibración. Esto es debido al golpeo que se realiza. Al golpear justo en el centro, estoy excitando al parche de una manera determinada de y tan solo se dan ciertos modos de frecuencia, es decir, el parche vibra en función de la fuerza que lo excite. En nuestro caso, son los modos axilimétricos los que se excitan tras este golpeo.

Con esto, queda más que conseguido el objetivo de corroborar la solución por medio de obtener resultados por dos métodos diferentes.

## 7.2 Variaciones realizadas

### 7.2.1 Introducción

Como ya hemos dicho antes, y como se muestra en el espectro mostrado anteriormente, a partir del quinto armónico los siguientes picos de frecuencia tienen muy poca amplitud, esto causa que no se oigan apenas y que su estudio carezca de interés. Por ello mismo, en los resultados he tomado ese quinto armónico como límite para la toma de datos.



## 7.2.2 Pretensión

Antes de comenzar a mostrar los resultados, hay que saber que cuando hablamos de la tensión, pretensión desplazamiento o deformación, hablamos del proceso de afinación de la caja en la que se tensa el parche para conseguir un sonido determinado.

Las variaciones que se han realizado se han empleado completamente en el primer método, mientras que he analizado con el segundo método solo dos de estas variaciones, la de  $0,3\text{ mm}$  y la de  $0,7\text{ mm}$ .

Primero se mostrará la tabla de datos que se ha creado usando el primer método, seguidamente se mostrarán una serie de gráficas que se han generado a partir de dichos datos, después pasaremos a los resultados del segundo método, donde se verán los espectros de sonido, la tabla de datos sacados de ahí, y una gráfica.

Abaqus muestra la frecuencia de cada modo de frecuencia, para generar la tabla se han tomado estos datos y se han ido colocando en una tabla Excel. Se han tomado los datos de la frecuencia de los modos axilsimétricos, es decir, los que realmente suenan. Estos armónicos se han numerado según el orden creciente de su frecuencia, medida en Hz.

Para obtener las gráficas hemos usado Excel, escogiendo la fila o columna de datos que compondrán el eje x y el eje y. Excel también nos ofrece la herramienta de pintar una curva llamada línea de tendencia. Es decir, de la curva que se crea a partir de los datos, Excel da la opción de mostrar una función (línea de tendencia) que se adapte a nuestra curva. Hay diferentes opciones de funciones: recta, polinómicas, potenciales... Y cuando se escoge una, Excel la adapta y reporta el valor R cuadrado, que hace referencia al ajuste de la línea de tendencia. Cuanto más se acerque este valor al valor unidad, uno, más ajustada estará la función respecto a la nuestra curva inicial. Esta herramienta se ha usado en diferentes gráficas, como se verá más adelante.

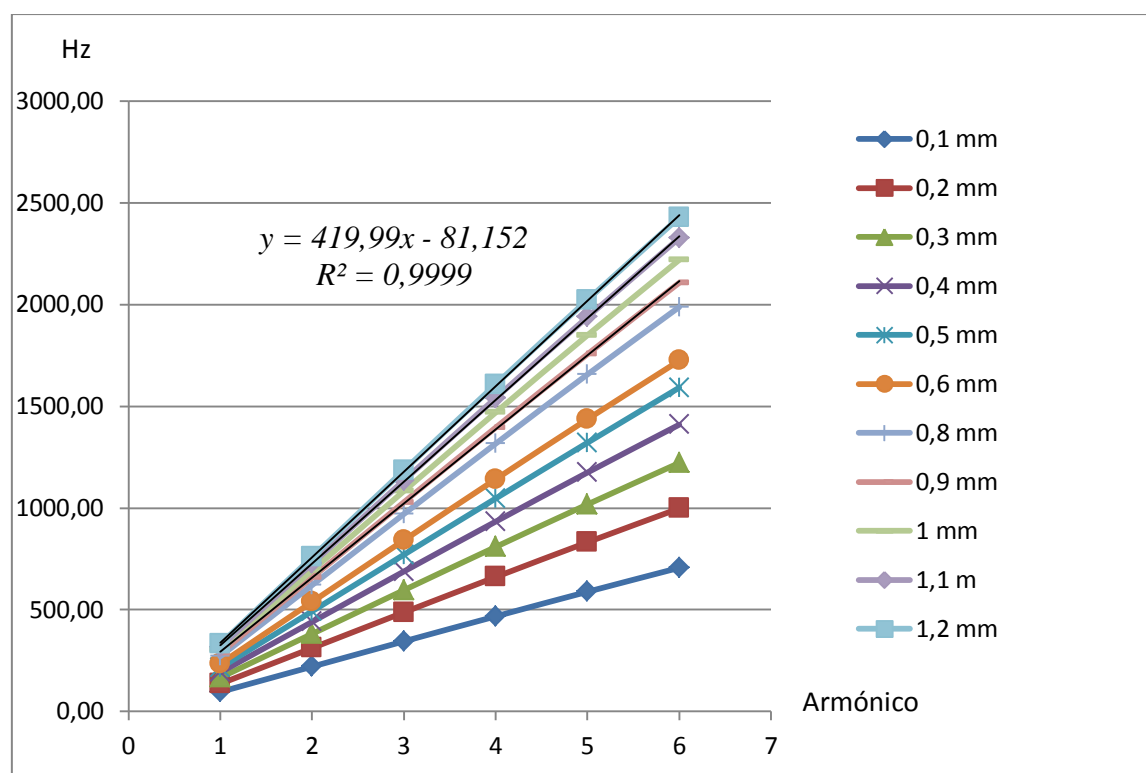
A continuación mostramos la tabla de datos que se ha obtenido según las variaciones de la deformación que simula el tensado del parche, medida en mm, y las frecuencias de los armónicos, medidas en Hz, ligadas a cada una de las pretensiones:

Desplazamiento radial (mm)	Frec. Fundam. 1	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
0,1	96,31	220,65	344,76	467,65	588,47	706,32
0,2	136,11	311,82	487,22	660,89	831,64	998,18
0,3	166,59	381,64	596,30	808,85	1017,80	1221,70
0,4	192,22	440,37	688,06	933,32	1174,50	1409,70
0,5	214,81	492,51	770,54	1047,00	1320,90	1591,50
0,6	235,09	538,58	841,52	1141,50	1436,40	1724,00
0,7	253,75	581,32	908,30	1232,10	1550,40	1860,90
0,8	271,08	621,02	970,33	1316,20	1656,30	1987,90

0,9	287,32	658,23	1028,50	1395,10	1755,50	2107,10
1	302,65	693,35	1083,3	1469,5	1849,2	2219,5
1,1	317,20	726,68	1135,40	1540,10	1938,10	2326,20
1,2	331,07	758,46	1185,1	1607,5	2022,8	2427,9

*Tabla 17: Resultados del primer método de las variaciones del radio del parche*

Seguidamente se muestra una gráfica con una recta por cada deformación. En esta primera gráfica que se muestran los armónicos están ordenados en el eje x desde la frecuencia fundamental hasta el quinto armónico. Mientras y en el eje y se muestra la frecuencia ligada a dicho armónico.



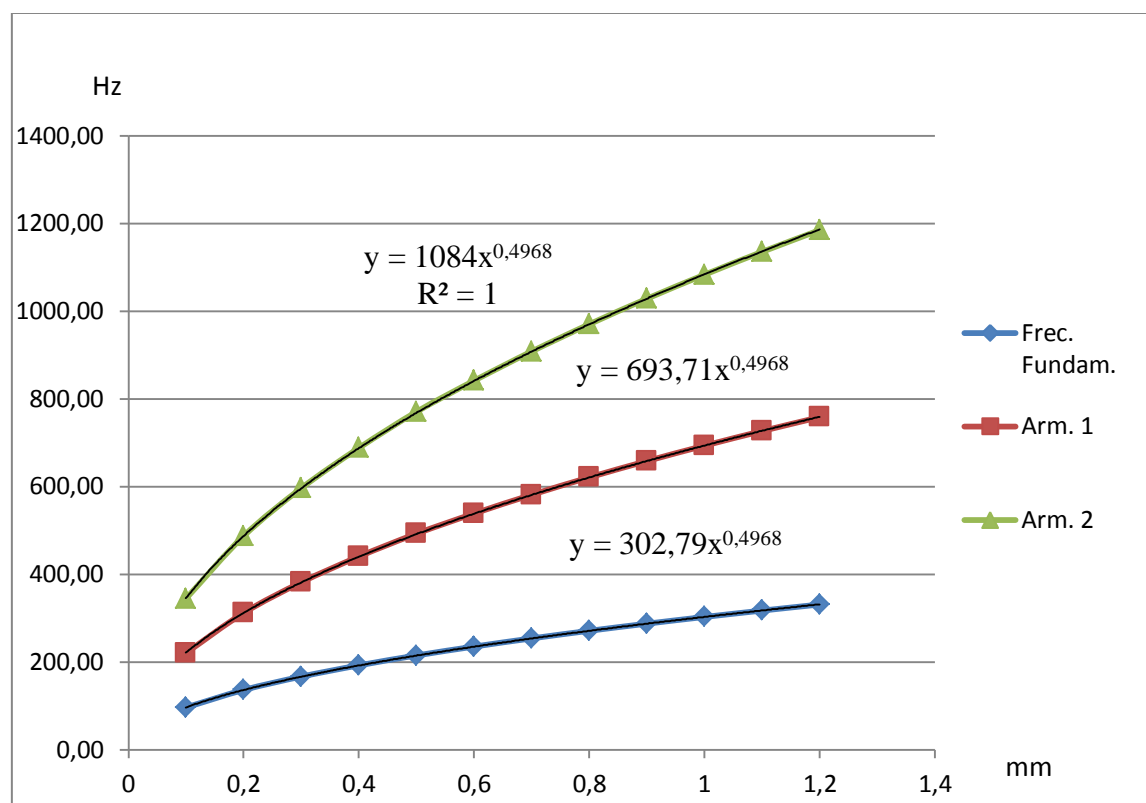
*Gráfica 9: Curvas de las frecuencias para cada variación de radio*

Como se aprecia en la gráfica, los modos de frecuencia van aumentando de frecuencia de forma lineal. El valor de  $R^2$  es prácticamente igual a uno, por tanto, no hay dudas de dicho comportamiento. Esto es ya conocido, el comportamiento acústico de cualquier instrumento se comporta así, es decir, los armónicos son múltiplos de sus frecuencias fundamentales.

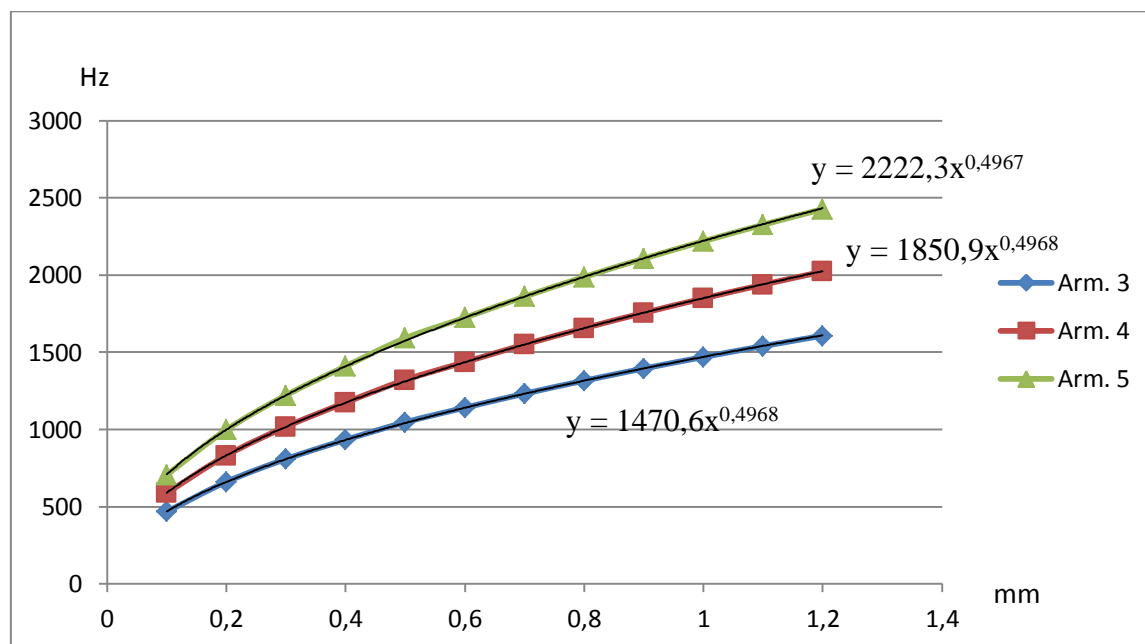
Esta gráfica es similar al hacer las variaciones respecto al radio y otras variables. Por tanto, no se van a mostrar más gráficas de este tipo en el que se muestran las frecuencias de cada variación en el eje y a lo largo del orden de armónicos. Sin embargo,

es interesante como va cambiando cada uno de los armónicos a medida que se va variando algún dato.

Las siguientes gráficas muestran las curvas de cada uno de los armónicos, siendo el eje y el eje de la frecuencia y el eje x siendo el desplazamiento medida en milímetros. Se han separado en dos gráficas para tener mejor visualización de las funciones que se han añadido a las gráficas. Si estuviesen todas las gráficas en la misma curva, se verían demasiado juntas.



*Gráfica 10: Curvas de las variaciones de radio para las tres primeras frecuencias que suenan, con sus ecuaciones*



*Gráfica 11: Curvas de las variaciones de radio para las tres últimas frecuencias que suenan, con sus ecuaciones*

Como se aprecia en la primera gráfica, el valor de R cuadrado es uno, así que las gráficas se adaptan perfectamente a la función mostrada. Esta curva es muy interesante, pues si nos fijamos, el valor del exponente de la función potencial es 0,4968 para todas las funciones. Estas ecuaciones podrían ser usadas para entender el proceso de afinación. La tendencia muestra que podemos saber qué nota está sonando sabiendo qué deformación tiene.

Estas curvas podrían tener aplicaciones interesantes para desarrollar mecanismos o aparatos de tensado automáticos, capaces de afinar el parche a partir de la deformación del parche. Otra posible aplicación en esta industria sería la de conocer qué desplazamiento radial vamos a necesitar aplicar al parche para obtener una nota en concreto.

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos con el segundo método, es decir, el espectro de sonido que se obtiene con dos desplazamientos diferentes, uno de 0,3 mm y otro de 0,7 mm. Primeramente, para el desplazamiento de 0,3, se presentan las gráficas espacio-temporal y amplitud-frecuencia.

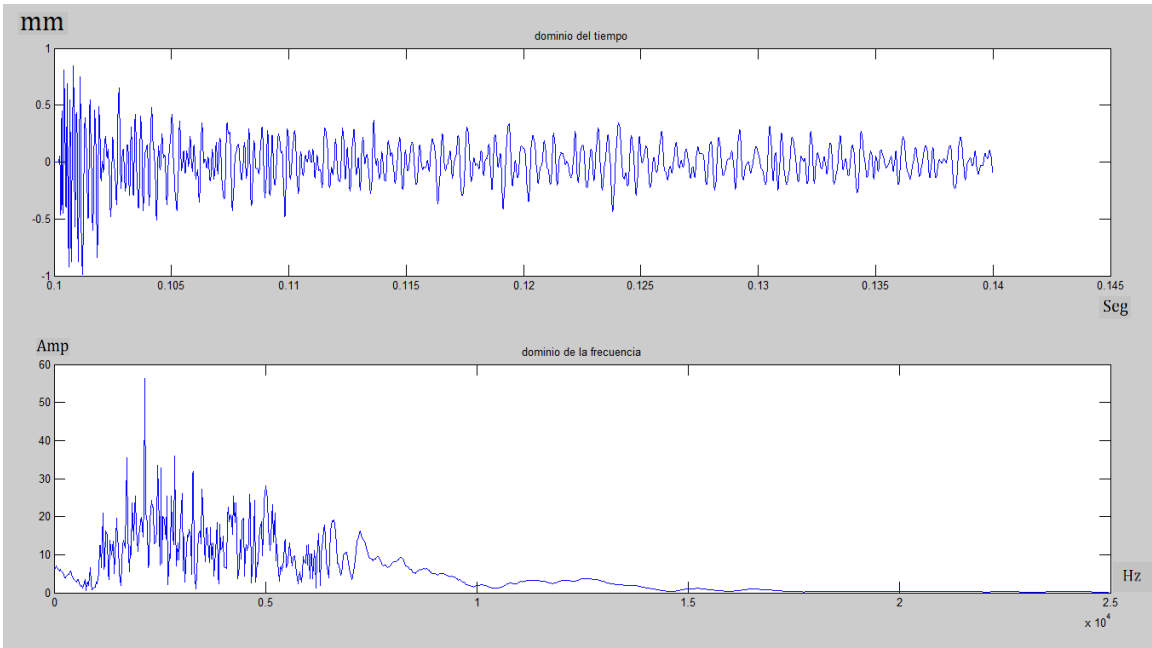


Tabla 18: Dominio del tiempo y de la frecuencia para una pretensión de 0'3 mm

Como se puede ver, el dominio del tiempo muestra una vibración con período menor que la mostrada a partir del dato inicial de 0,5; y el dominio de la frecuencia nos muestra un espectro de sonido muy atípico, con multitud de picos. Esto es debido a que el comportamiento del parche no es el debido, dado que al ser tan poca tensión, la membrana aún está suelta. Seguidamente se muestra el espectro de sonido para la pretensión de 0,7, con su gráfica espacio-temporal.

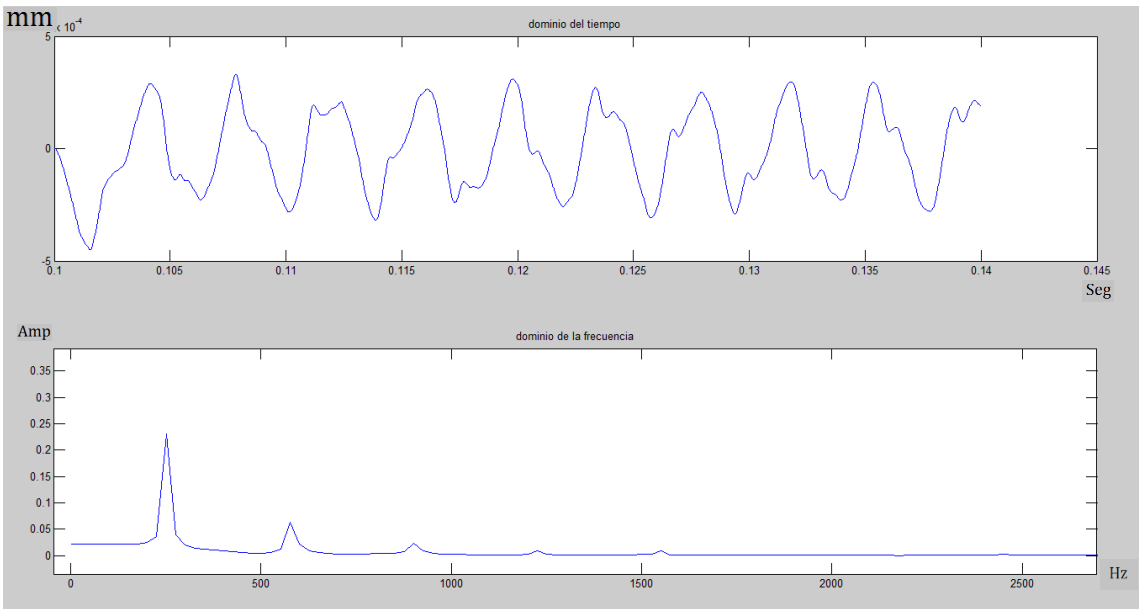
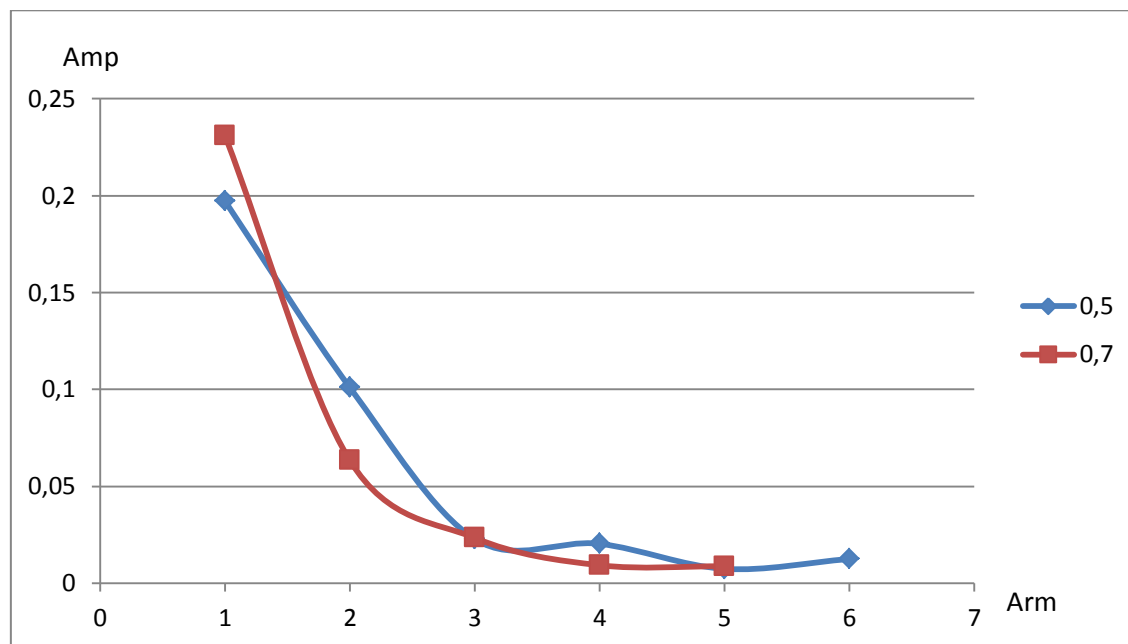


Tabla 19: Dominio del tiempo y de la frecuencia para una pretensión de 0'7 mm

Como se puede ver, ambas gráficas tienen sentido. A continuación se muestra una gráfica sacada a partir de los datos del espectro, dado que Matlab nos da la opción de mostrar los valores de los picos de frecuencia, estos datos se han metido en una tabla de datos que se muestra en el anexo [Anexo 1: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación de la pretensión].

En dicha gráfica en la que se compara la amplitud del espectro de sonido con pretensión de 0,5 y de 0,7. En el eje y se muestra la amplitud, y en el eje x el número de armónico.



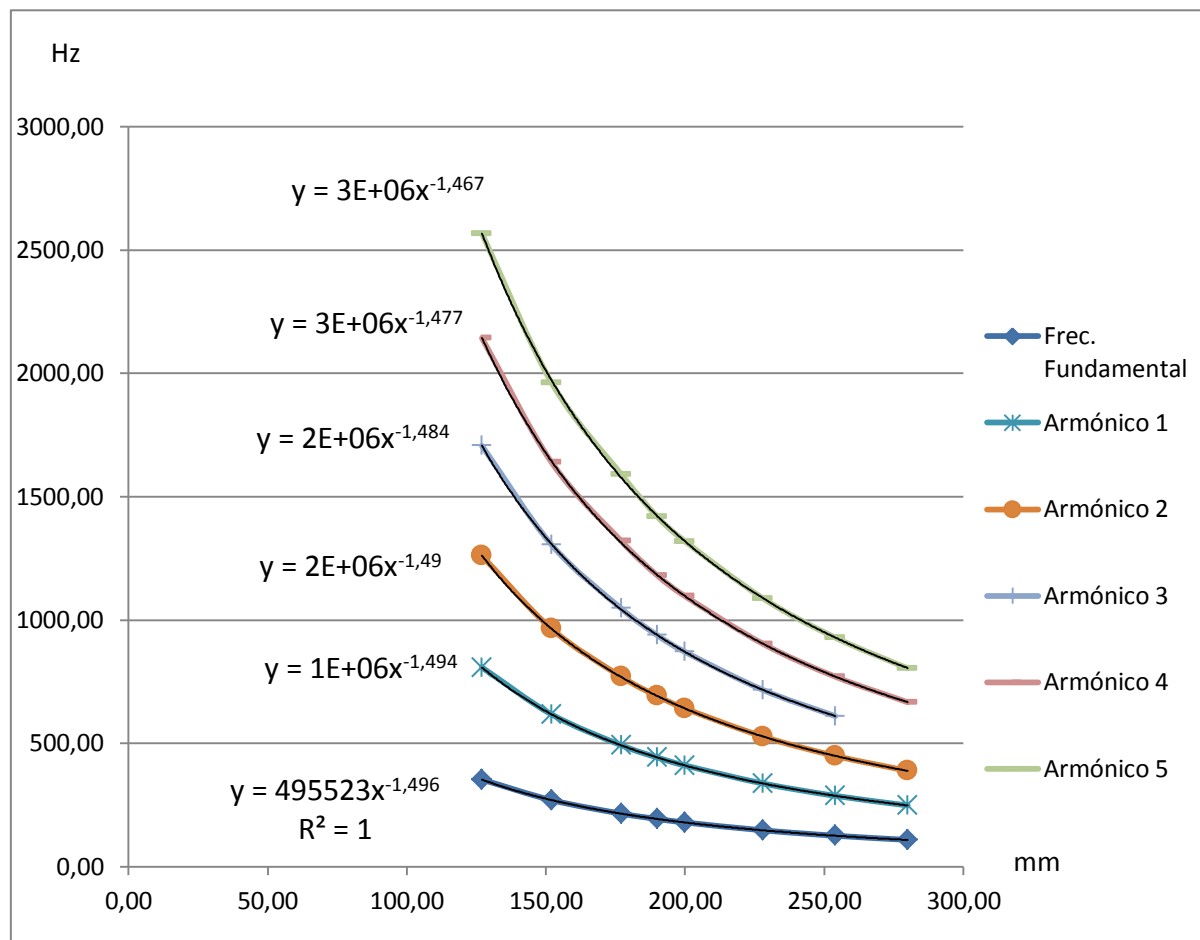
Gráfica 12: Curvas de los picos de frecuencia para una pretensión de 0,5 y de 0,7 mm

Como se ve en esta gráfica, hay mucha más diferencia entre la amplitud de la frecuencia fundamental y la de sus armónicos, para la pretensión de 0,7 que para la de 0,5. Acústicamente esto causa que con la pretensión de 0,7 produzca un sonido más definido y con más “pegada” mientras que al estar menos tensado, el sonido tiene más armónicos, se entiende menos e incluso se diría que el sonido “está sucio”. Esto es muy interesante para saber sobre qué variables se debe actuar para variar el sonido de una manera u otra, y además, poder predecir cómo sonara un parche determinado con una u otra tensión.

### 7.2.3 Radio

Las variaciones que se han realizado del radio, se han aplicado en el primer método por completo, y tan solo se ha usado el segundo método para el radio de 127 mm, usado en uno de los timbales de la batería. En este caso no se mostrará la tabla de datos, pero se puede ver en los anexos [Anexo 2: Tabla de datos de los modos armónicos en función del radio del parche].

A continuación se mostrará una gráfica similar a la usada para las variaciones de la pretensión, una gráfica de la frecuencia sobre el dominio del radio con una curva por armónico de la cual se han obtenido sus ecuaciones.

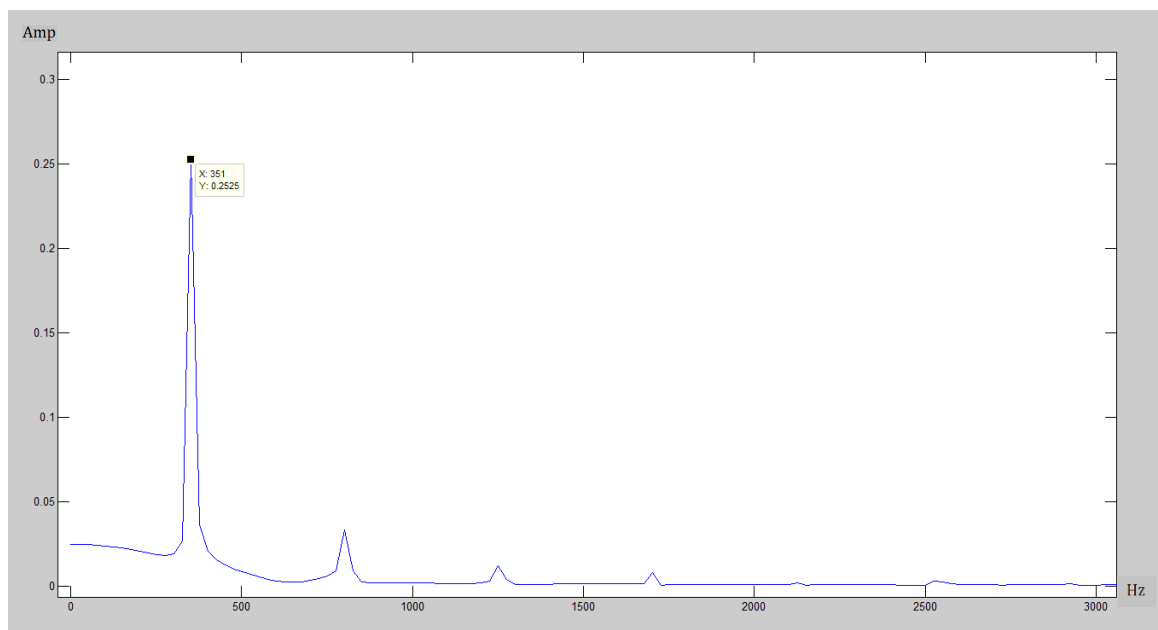


Gráfica 13: Curvas de las variaciones de pretensión para cada frecuencia, con sus ecuaciones

Como se puede apreciar en esta gráfica, el valor R cuadrado es igual a uno, por lo que los datos sacados se ajustan perfectamente a la función que se muestra. Además, se muestra que la tendencia es potencial decreciente, esto quiere decir, que a medida que vamos disminuyendo el radio, la frecuencia es más y más aguda. Esto se podría usar para conseguir una nota determinada antes de fabricar el parche, así, como posible aplicación, se podría preparar un grupo de cajas, timbales o tambores variando los radios, para que cubran un grupo de frecuencias determinadas.

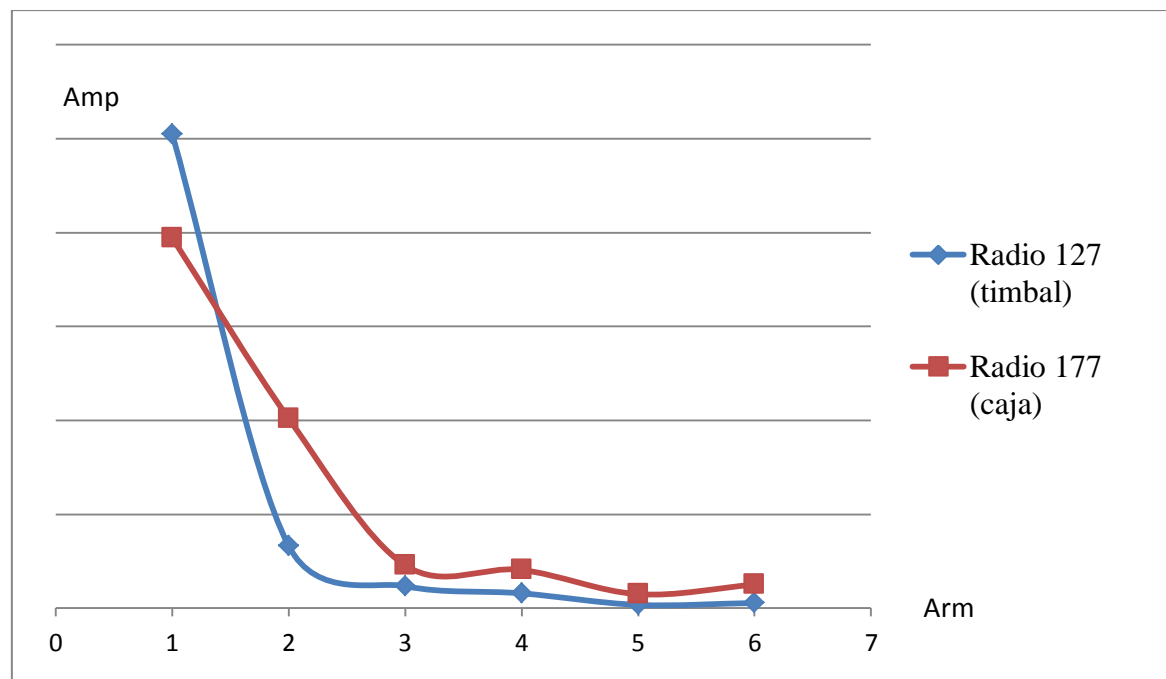
Esta información es muy útil para cualquier percusionista que desee configurar el sonido de su batería antes de ponerse a probar como un loco, unas baterías y otras sin saber cómo varía el sonido en función del radio de sus componentes. Así, si quieres una batería con unos timbales más o menos agudos, se podría recurrir directamente a esta gráfica para saber qué radio de timbal es el apropiado sabiendo qué frecuencias de agudos quieres tener.

Seguidamente mostraremos los resultados sacados del segundo método. Tan solo se mostrará el espectro del timbal de *127 mm de radio*.



*Espectro de sonido 5: Radio de 127 mm*

Los datos que se han sacado de este espectro se muestran en la tabla de los anexos: [Anexo 3: *Tabla de datos del espectro de sonido para la variación del radio del parche*]. A partir de estos datos, se han creado la siguiente gráfica en la que se muestran dos curvas de la amplitud de los picos, una para la caja y otra para el timbal.



*Gráfica 14: Curvas de los picos de frecuencia para radios de 127 y 177 mm*



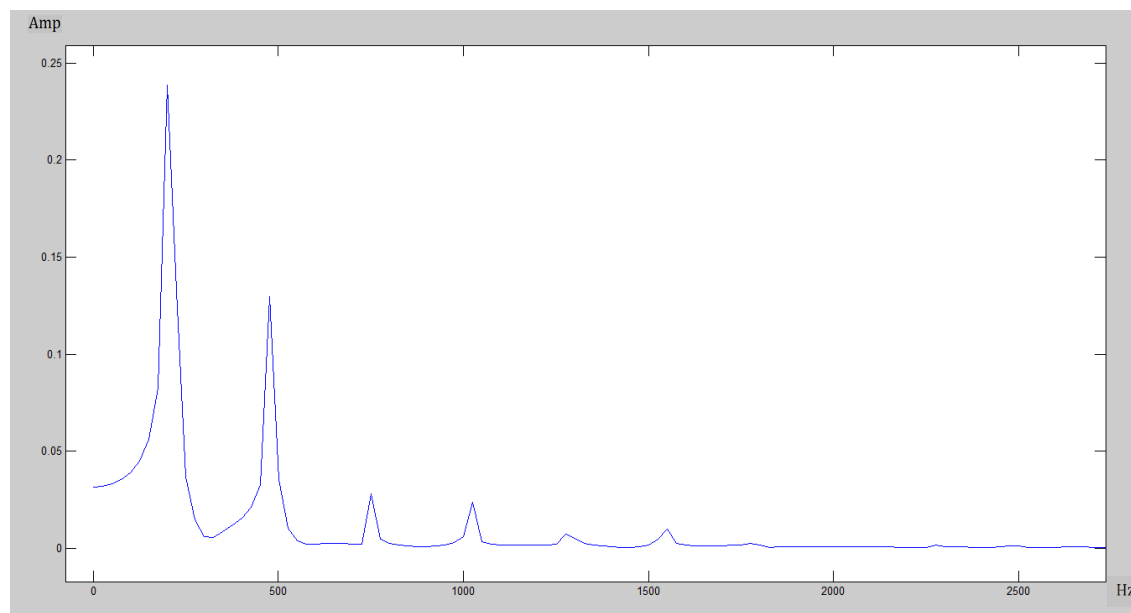
Como se aprecia, el sonido que sale del parche de una caja es completamente diferente. Por un lado, la nota fundamental suena más definida en el timbal, y está mucho más localizada en un pico de frecuencia. Mientras que el sonido de la caja tiene más armónicos, esto es, que los armónicos suenan más alto de volumen en relación a la amplitud de la frecuencia fundamental, esto quiere decir que la caja cubre más frecuencias.

Esta información es muy útil para conseguir entender mejor el comportamiento acústico de una batería. De la misma manera que antes, este gráfico puede usarse para configurar el sonido de una batería.

## 7.2.4 Materiales

Como ya se ha comentado, las variaciones que se han realizado en este modo han sido solo estudiando y comparando la alternativa del Kevlar como material para parches. Primeramente se usó el primer método por el cuál se obtuvieron los modos de vibración para el Kevlar, pero su disposición era evidentemente igual al del Mylar, por tanto solo se mostrará el espectro de sonido comparando por medio de una gráfica las amplitudes de los armónicos.

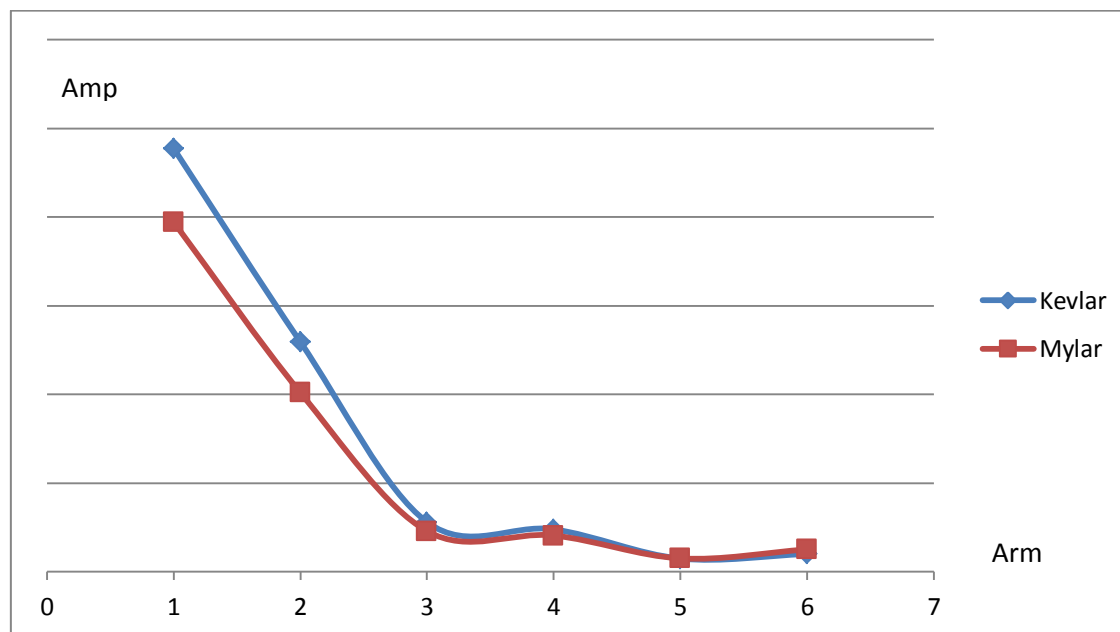
Primeramente se muestra el espectro de sonido para el parche fabricado de Kevlar:



*Espectro de sonido 6: Parche de Kevlar*

A partir de esta tabla se han obtenido unos datos, que se muestran en la tabla correspondiente en los anexos: [Anexo 4: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación del material].

A continuación se muestra la gráfica sacada de comparación de las amplitudes de los armónicos entre la curva de un material y de otro.



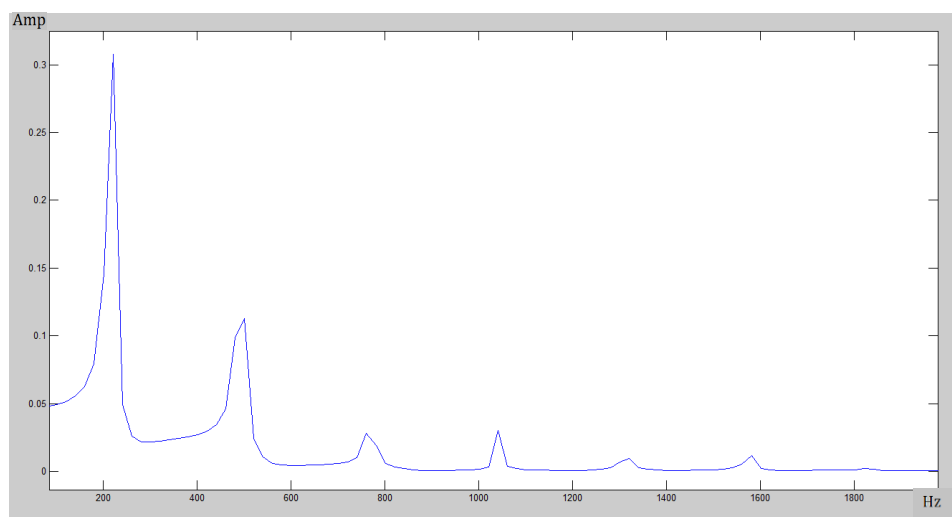
*Gráfica 15: Curvas de los picos de frecuencia para los materiales empleados, Kevlar y Mylar*

Como se aprecia, el sonido no va a variar demasiado, como ocurría con el radio, pero sí que tiene diferencias, principalmente que el Kevlar produce un sonido con más amplitud, esto es, con más volumen. Este análisis se podría hacer para cualquier material posible, esta es la mejor aplicación de esta parte del análisis.

### 7.2.5 Zona de golpeo

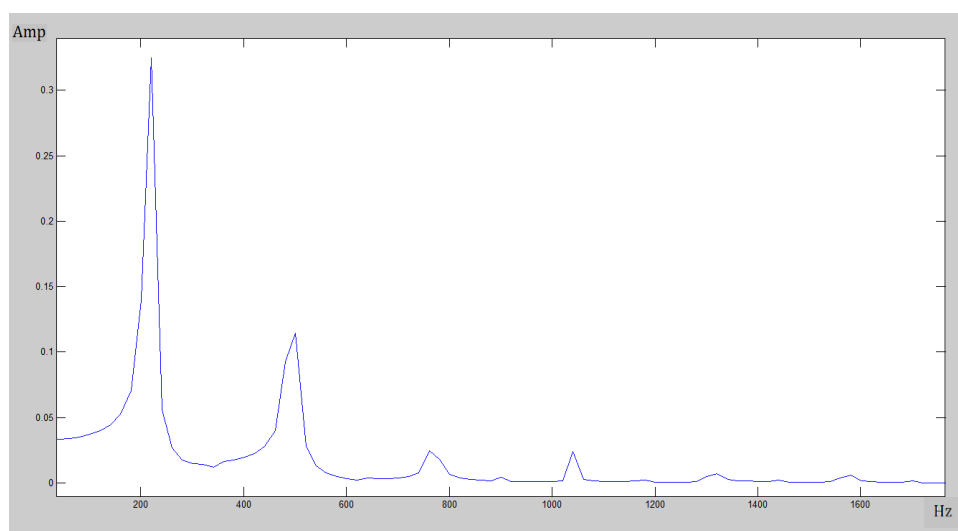
En esta parte se estudiarán los resultados obtenidos al cambiar la zona de golpeo, es decir, la ubicación del área donde se coloca la presión que simula el golpeo de la baqueta. Esta variación solo se ha estudiado en el segundo método, dado que es en el que se pone en juego el golpeo.

Primeramente se recuerda el espectro de sonido que se obtiene sin desplazamiento. Este espectro está sacado de un análisis hecho para 0,05 seg, por ello está menos definido que con 0,1 seg, espectro que se mostró anteriormente.



*Espectro de sonido 7: Golpeo sin desplazamiento*

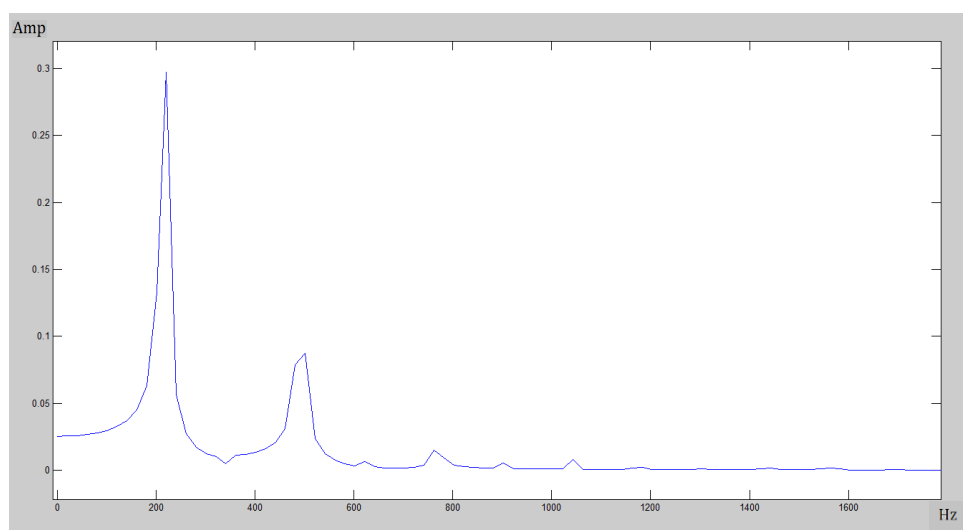
Seguidamente se muestra el espectro de sonido para un desplazamiento de 15 mm del centro del golpeo con respecto al centro.



*Espectro de sonido 8: Golpeo con desplazamiento de 15 mm*

Como se aprecia, el sonido apenas ha variado con respecto al desplazamiento cero. De esto sacamos la conclusión inmediata de que, a la hora de tocar, no es necesario golpear en el estricto centro, dado que si se golpea algo desplazado, el sonido será prácticamente el mismo. Incluso se puede comprobar que la amplitud para el espectro desplazado es mayor que para el desplazamiento cero, por tanto, sería recomendable golpear un poco desplazado y así conseguir un sonido con más ataque, más potente. La principal diferencia entre los dos primeros espectros es que en este segundo aparecen nuevos armónicos, pues se aprecian picos leves entre los armónicos del desplazamiento cero.

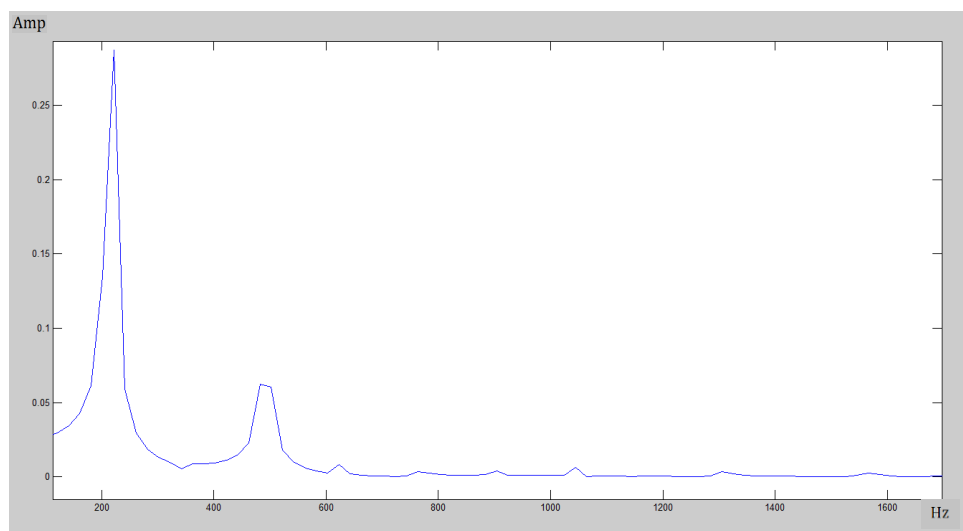
Seguidamente se muestra el espectro para un desplazamiento mayor, de 30 mm.



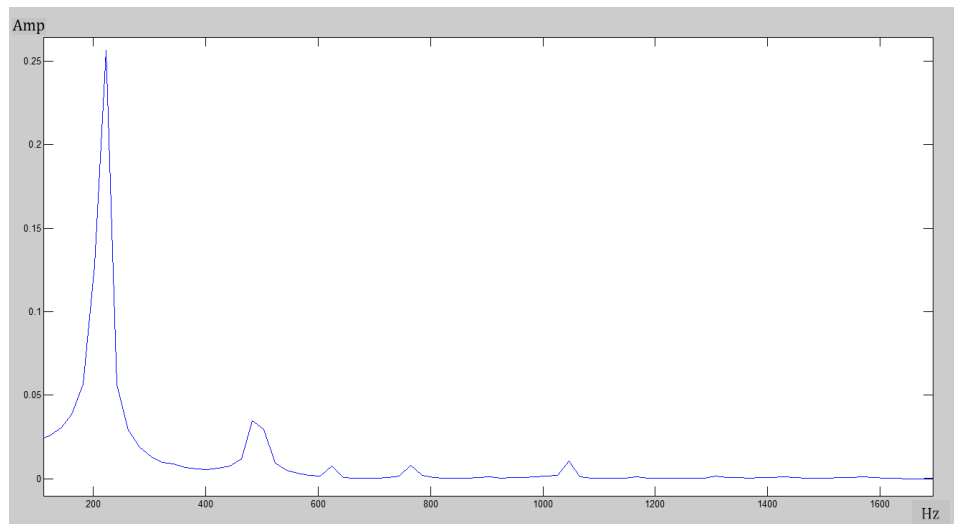
*Espectro de sonido 9: Golpeo con desplazamiento de 30 mm*

Se puede ver que, por un lado ha disminuido la amplitud de la frecuencia fundamental, y además, cada vez aparecen más picos, es decir, más armónicos, que tienen una amplitud bastante por debajo de los armónicos del desplazamiento cero, pero que van adquiriendo protagonismo.

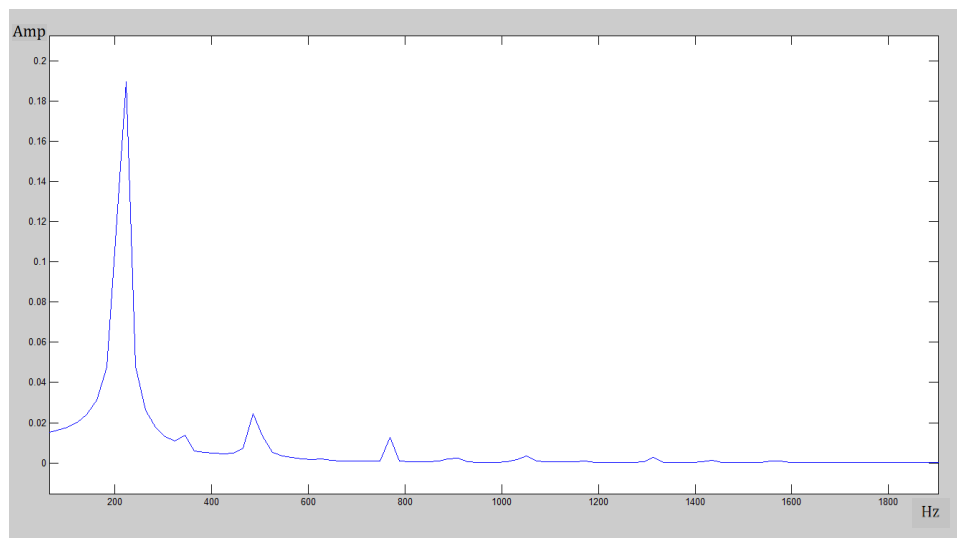
A continuación se mostrarán los siguientes espectros de sonido para 45, 60, 90 y 120 mm.



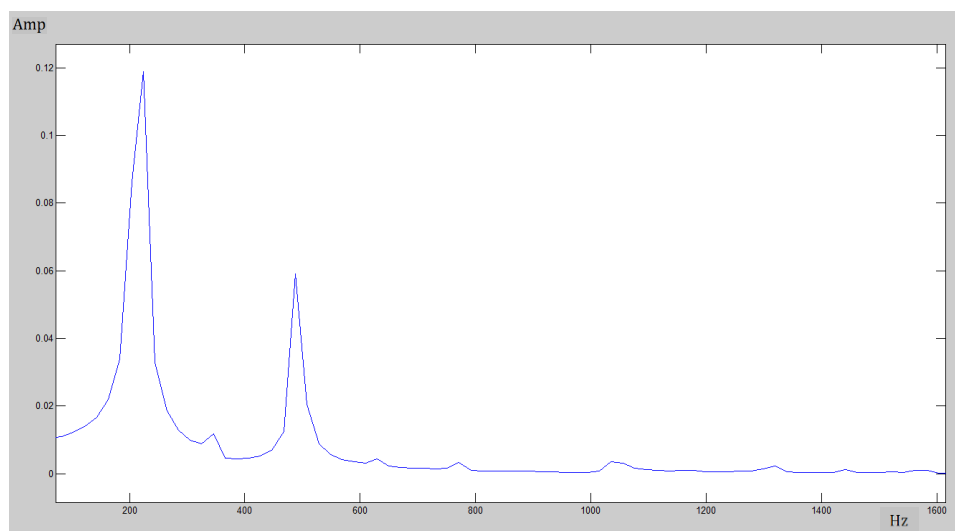
*Espectro de sonido 10: Golpeo con desplazamiento de 45 mm*



*Espectro de sonido 11: Golpeo con desplazamiento de 60 mm*



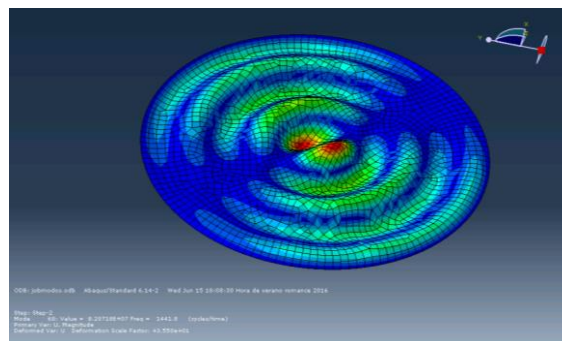
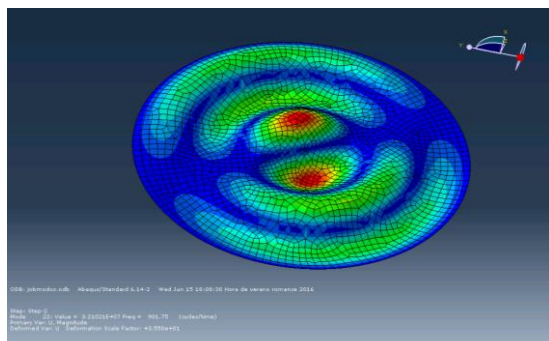
*Espectro de sonido 12: Golpeo con desplazamiento de 90 mm*



*Espectro de sonido 13: Golpeo con desplazamiento de 120 mm*

Si nos fijamos en los armónicos y dejamos a un lado la frecuencia fundamental, podemos ver que el primer armónico ha ido cambiando de frecuencia, a medida que vamos desplazándonos del centro. Va disminuyendo la frecuencia de 501 Hz y apareciendo una de unos 465 Hz. Además, aparece un pico entre la frecuencia fundamental y el primer armónico, de alrededor de 344 Hz, que cada vez adquiere más protagonismo. A partir del primer armónico, en general, van desapareciendo unos armónicos y van apareciendo otros.

Lo que está ocurriendo es que al golpear la caja en otro lugar que no es el centro, estamos excitando otros modos de vibración, de los que sacamos del primer método. Así, si volvemos a la presentación de los resultados para el primer método, veremos la frecuencia de 342, 458 y 625 Hz, donde podemos observar cómo se excita el parche. También, aparecen muy claramente la frecuencia de 901 y 1441 Hz. Dichas frecuencias se muestran a continuación, para entender mejor el comportamiento del parche cuando golpeamos desplazado del centro.

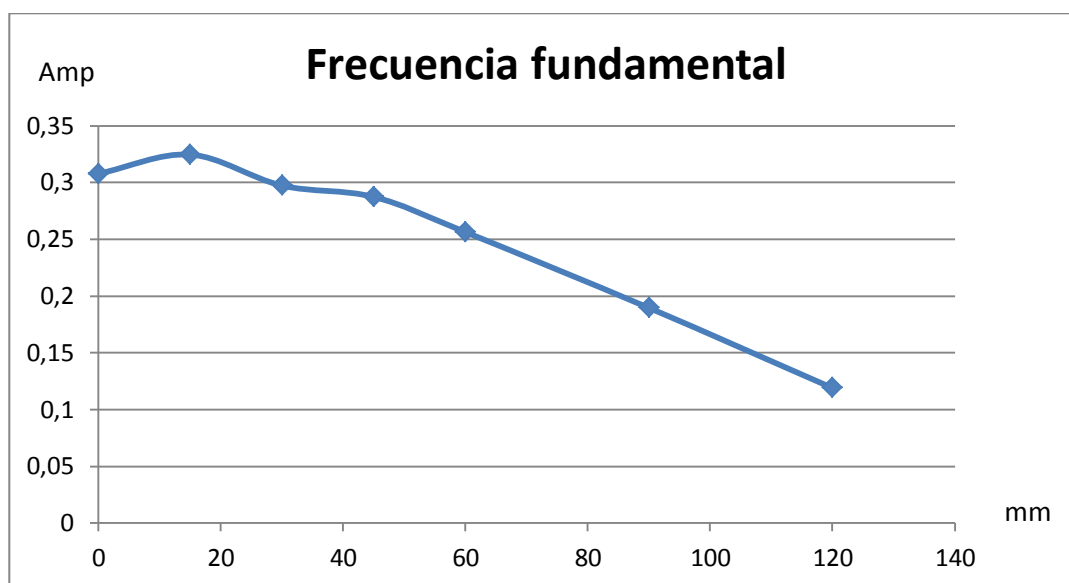


*Imagen 33: Nuevas vibraciones al golpear el parche desplazado del centro*

Todas estas variaciones se podrían usar para estudiar a fondo todas las posibilidades de sonido que ofrece un instrumento de percusión como una caja, bombo... De hecho, el bombo tendrá un espectro de sonido similar al espectro mostrado para un desplazamiento de 120 mm, dado que es a esa distancia donde se golpea con la maza. Dicho espectro muestra una predominancia por dos picos, la frecuencia fundamental y el primer armónico, a partir de ahí, no aparecen apenas amplitudes significativamente importantes, por ello se deduce que el bombo tiene un sonido más seco que el de la caja. Además, el primer armónico del bombo no es un modo de vibración axilsimétrico, sino que es el nombrado como “Modo 2” en la *Tabla X: tabla de modos de frecuencia no axilsimétricos*, aunque el que predomina sigue siendo el mismo axilsimétrico de 501 Hz.

Todos los datos que se han obtenido de los espectros de sonido se pueden ver en los anexos: [*Anexo 5: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación de la ubicación del golpeo*]

Es muy interesante estudiar cómo varía la amplitud de la frecuencia fundamental a medida que nos vamos desplazando desde el centro, para ver qué repercusiones sobre el volumen del sonido puede tener este desplazamiento. A continuación se muestra la gráfica que muestra la amplitud de la frecuencia fundamental sobre el dominio de la distancia del desplazamiento.



*Gráfica 16: Variación de la amplitud de las frecuencias fundamentales para cada variación de la ubicación de golpeo*

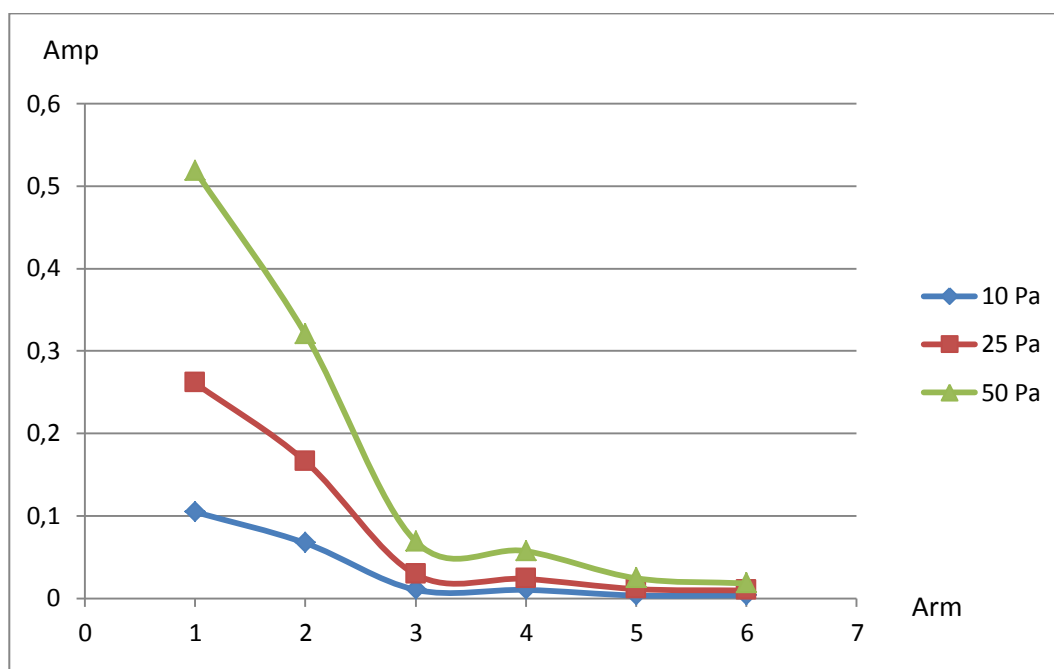
Como ya dije, es interesante ver, que si nos desplazamos un poco del centro, obtendremos un sonido más potente. Además, podemos apreciar la gran repercusión de este desplazamiento sobre el sonido. Al disminuir la amplitud de la frecuencia fundamental, se obtiene un sonido menos definido, de peor calidad.

Tras esta parte del análisis, conocemos cómo se comportará un parche ante los posibles desplazamientos del golpeo. De aquí deducimos que es mejor aplicar la fuerza

de golpeo unos milímetros desplazado del centro. Este desplazamiento es instintivo, pues rara vez se golpea sobre el centro exacto.

### 7.2.6 Presión de golpeo

Los espectros de sonido que ha reportado Matlab de las diferentes fuerzas de golpeo tienen los picos de frecuencia localizados en los mismos valores de frecuencia. Los datos obtenidos de dichos espectros se pueden ver en la tabla de los anexos: [*Anexo 6: Tabla del espectro de sonido para la variación de la presión del golpeo*]. Esto evidencia que al golpear más fuerte o más flojo no se cambia la nota, por tanto el sonido va a ser muy similar siempre, tan solo variará la amplitud de la onda sonora. A continuación se va a mostrar una gráfica en la que se representan las diferentes amplitudes de estos picos de frecuencia para ver de manera más visual como varía la amplitud en función de la variación de la fuerza de golpeo en todos sus armónicos.



*Gráfica 17: Curvas de la amplitud de los picos de frecuencias para cada variación de la presión de golpeo*

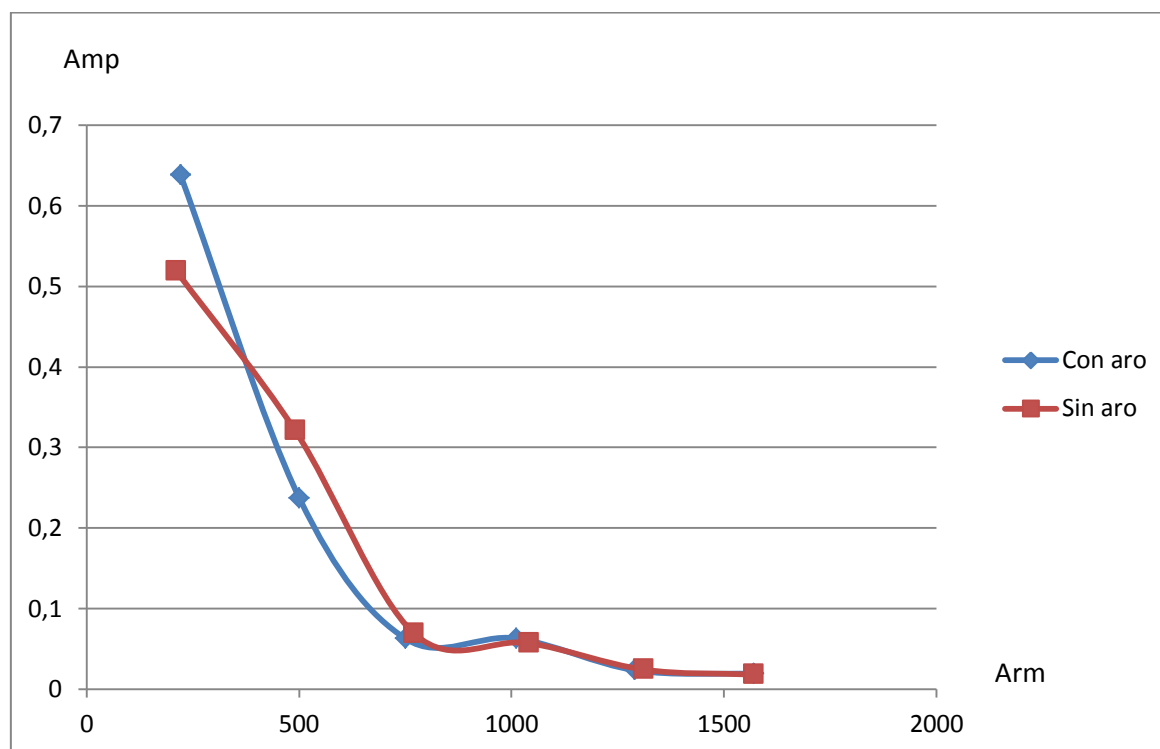
De esta gráfica también se desprende que la nota fundamental suena más nítida y rotunda con más fuerza de golpeo. Esto se aprecia al ver que las amplitudes de las frecuencias son más similares cuanto menos presión se aplique.



### 7.3 Modelo con aro

El modelo de parche colocándole el aro se ha estudiado por el primer y el segundo método. Sin embargo, el primer método por sí mismo tan solo aporta la información de que la manera que tiene de vibrar el parche es la misma con o sin aro. Por tanto, el grueso de la información obtenida nos la ha dado el segundo método, del cual hemos podido recoger información de las amplitudes de los diferentes armónicos. Los datos que se han obtenido de los espectros de sonido se muestran en la tabla de los anexos: [Anexo 7: Tabla de datos del espectro de sonido para el equipamiento del aro]. Como se puede ver en la tabla, y más abajo en la gráfica, las frecuencias apenas varían de tener o no colocado el “control ring”.

A continuación se muestra la gráfica en la que se comparan las amplitudes de cada pico de cada armónico del espectro de sonido del parche con el aro y sin el aro.



Gráfica 18: Curvas de la amplitud de los picos de frecuencias para el parche con y sin aro quita armónicos

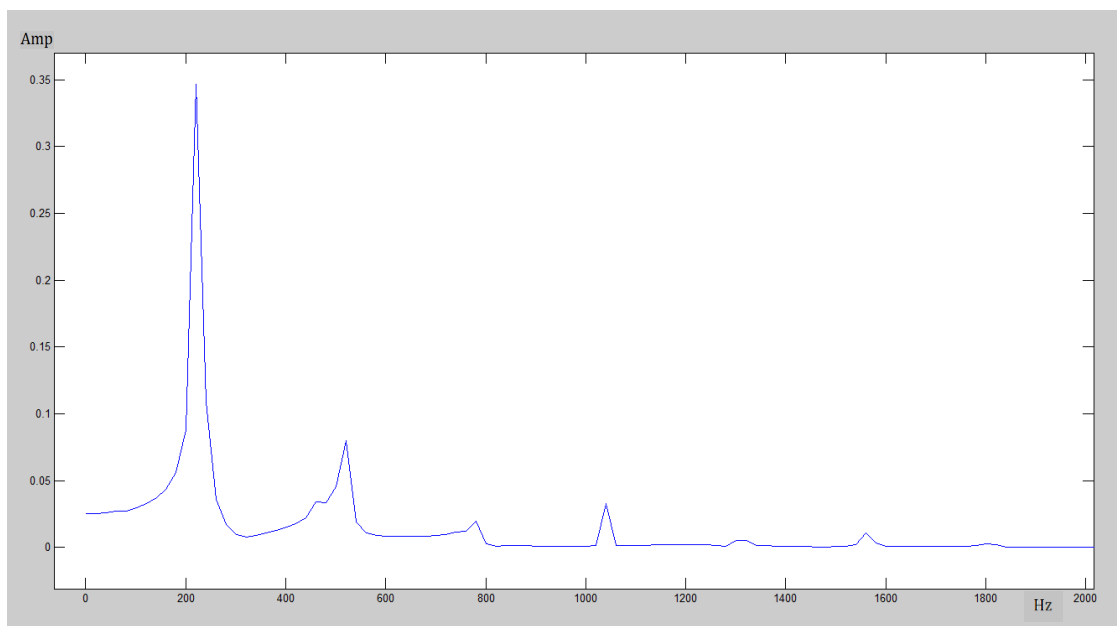
Como se puede ver en los resultados, el parche con aro tiene, por un lado, la amplitud de la frecuencia fundamental más alta, y por otro lado tiene las amplitudes de los armónicos en general más bajas. Esto corrobora su nombre de “quita-armónicos”. Las aplicaciones de esta parte pueden ser las de probar diferentes radios del aro, diferentes materiales, además de diferentes geometrías, para observar si además de estas variaciones en el sonido, se podrían conseguir otras. Además, es una información muy

útil que cualquier batería querría conocer dado que podría ayudar a la elección de un tipo de elemento u otro, al conocer perfectamente cómo varía el sonido de manera numérica.

### 7.3 Modelo con moongel

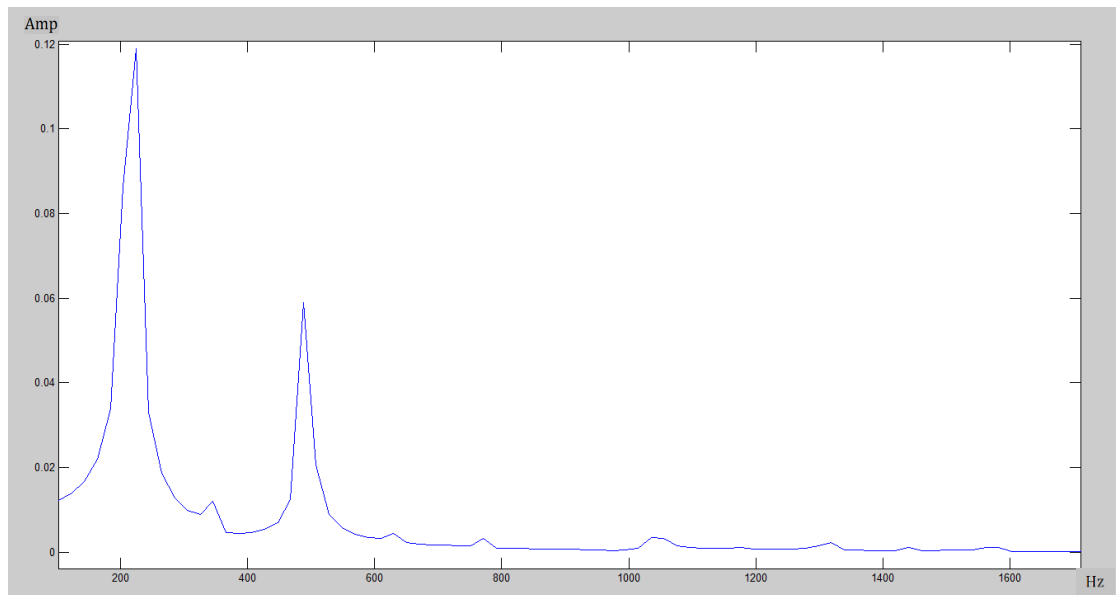
Para este modelo se han empleado ambos métodos. Los espectros de sonido muestran que ciertas frecuencias cambian, de manera similar a las variaciones de la ubicación del golpeo. Es decir, aparecen nuevas vibraciones en con frecuencias diferentes y con amplitudes significativamente importantes. Primeramente diré que la variación de para los moongel colocados a 150 milímetros del centro con un peso de 50 gramos muestra un espectro de sonido muy similar al que tendría el parche sin moongel, con la única diferencia de que la amplitud de las frecuencias es menor para el parche sin moongel.

Todos los datos obtenidos de los espectros de sonido se muestran en la tabla: *[Anexo 8: Tabla de datos del espectro de sonido para el elemento moongel]*. Mostraremos un ejemplo del espectro de sonido obtenido con un par de masas de 20 gramos colocadas a 125 milímetros del centro para entender qué está ocurriendo en el parche cuando le colocamos los moongel.



*Espectro de sonido 14: Parche con moongel de 20 gr a 125 mm del centro*

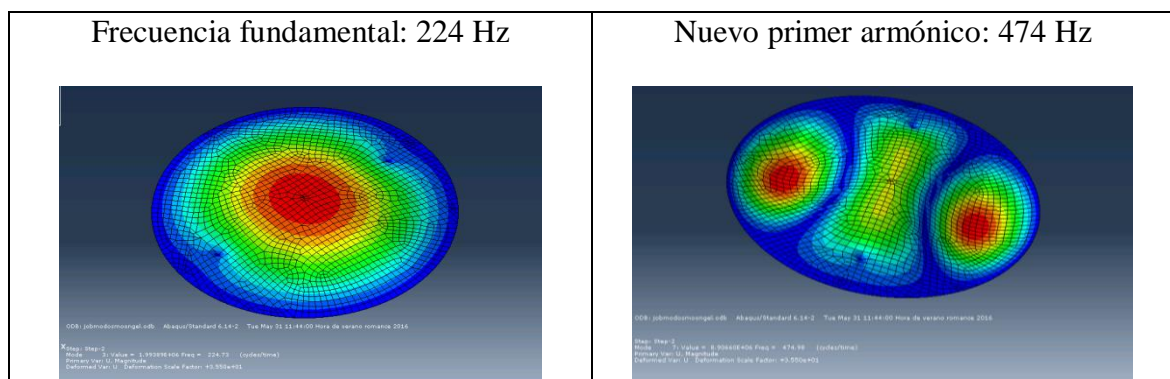
Se pueden apreciar los nuevos picos de frecuencia perfectamente, ese pico antes del primer armónico, y esa meseta en la que se ha convertido el cuarto armónico. Cuando colocamos estos 20 gramos a 150 milímetros del centro, obtenemos este otro espectro de sonido:



*Espectro de sonido 15: Parche con moongel de 20 gr a 125 mm del centro*

Aquí podemos ver un nuevo primer armónico claramente, y cómo, los armónicos a partir del segundo, tienen una amplitud muy reducida en comparación con los armónicos de otros espectros. Por tanto, ya podemos corroborar este elemento quita armónicos, como un elemento, que con la masa y la colocación adecuada, convierte el sonido de la caja en un sonido con menos armónicos, más definido, con más ataque y pegada.

Seguidamente vamos a estudiar estos nuevos picos, mostrando la manera en la que vibra el parche con los moongel colocados. Estas vibraciones se han obtenido del primer método. Primeramente es interesante observar la vibración de la nueva frecuencia fundamental:



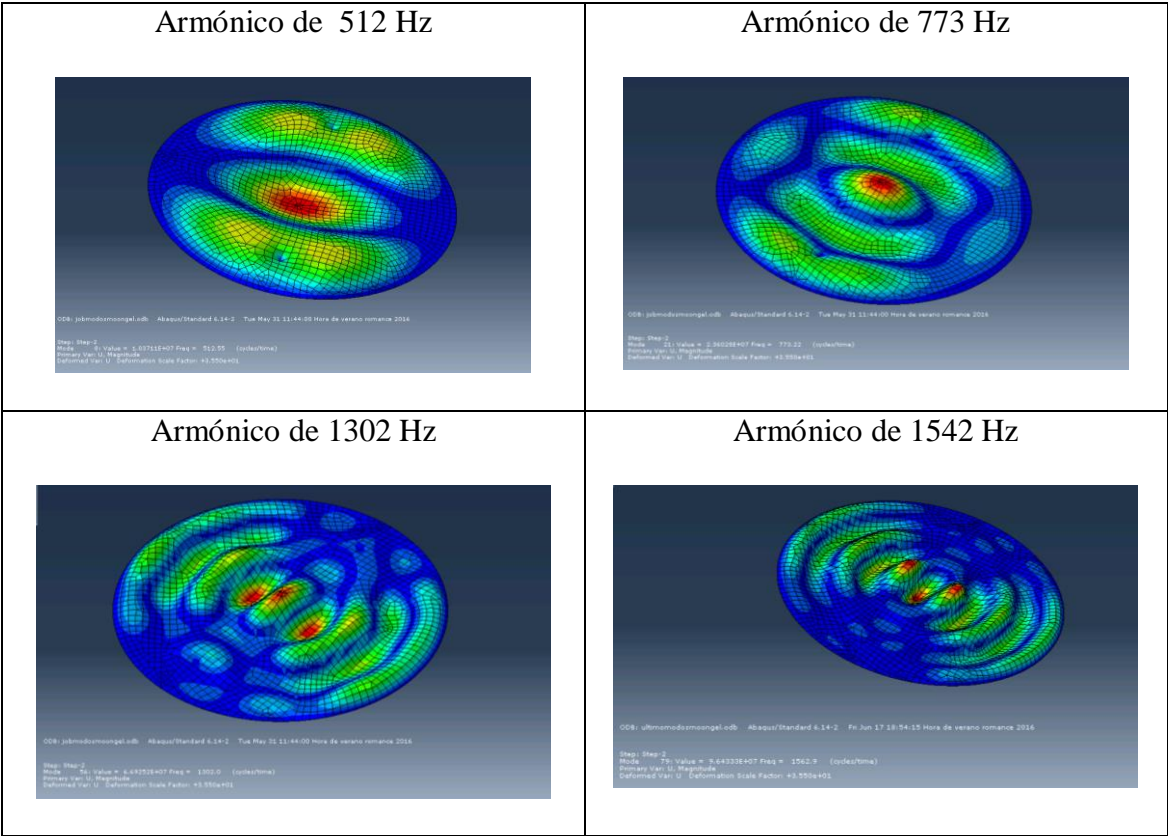
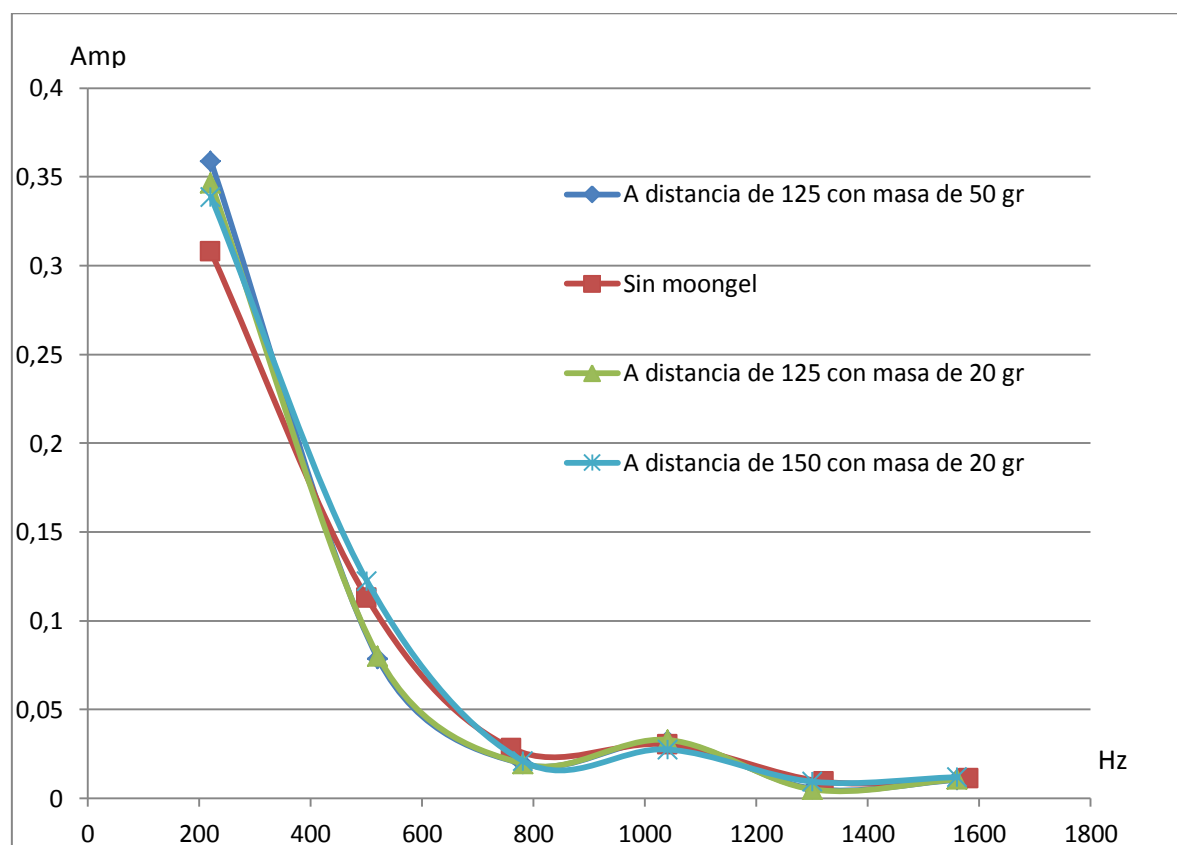


Tabla 20: Vistas de las nuevas vibraciones del parche con los moongel colocados

Como se ve, aparecen armónicos de gran importancia según muestra la tabla de los anexos, que no son axilsimétricos, sino que tienen nuevas formas, tratándose así de unas nuevas vibraciones del parche. Además, vamos a mostrar una gráfica con las variaciones estudiadas, similar a las anteriores. En esta gráfica solo se mostrarán los las amplitudes de los modos axilsimétricos para tener la misma información en todas las curvas y poder comparar cómodamente. Es decir, no se tendrán en cuenta los nuevos armónicos.



*Gráfica 19: Curvas de la amplitud de los picos de frecuencia para las variaciones del modelo con moongel*

Como se puede ver, las tres curvas que hay para los modelos con moongel tienen más amplitud, por tanto, aquí tendríamos una ventaja de este elemento. Además, también se puede apreciar que las curvas para una distancia de 125, es decir, la curva azul oscuro y verde, se solapan. Esto quiere decir, que es más importante colocar bien el moongel que utilizar el moongel con masa ideal. De hecho, al colocar la masa de 20 gramos a 125 milímetros no conseguimos que los armónicos apenas varíen su amplitud con respecto a no colocar el moongel.

Es interesante reflexionar que para simular el moongel, solo hemos colocado un par de masas en su lugar, de tal manera, que podría servirnos otros elementos que se adhieran al parche, para evitar nuevas vibraciones indeseadas. Siempre y cuando el elemento en cuestión esté colocado correctamente, en la posición pertinente, nos servirá para conseguir el objetivos de disminuir la amplitud de los armónicos de la caja.

## 8. Conclusiones y trabajo futuro

Sobre la música se ha escrito mucho, y en general siempre se ha hablado de una manera demasiado cualitativa, sin tener la posibilidad de cuantificar. Hoy día, con la nueva tecnología, se han podido estudiar las ondas sonoras de manera científica, analizando las ondas que generan diferentes instrumentos para conocer mejor su comportamiento. Sin embargo, desconozco un trabajo tan exhaustivo sobre un instrumento en particular como el presente proyecto. Es aquí donde reside la importancia de este análisis. Pues no solo hemos entendido el suceso de golpeo que acontece entre una baqueta y una caja, viendo su espectro de sonido y sus vibraciones, sino que hemos visto cómo afectan las variables que tiene el sistema al sonido. Ordenaré las conclusiones en función de los objetivos que nos marcamos al comienzo del trabajo.

- **Simular el golpeo baqueta caja de una batería:**

Este objetivo está conseguido de manera elemental, quiero decir, hemos simulado lo más fundamental, el parche y el golpeo. Al simular solo esto, los resultados son más elegantes, más sencillos de entender, variar y analizar. Como trabajo futuro, se podría ampliar el estudio simulando también la carcasa de madera que recubre la caja, la bordonera y los herrajes, dado que, aunque estos elementos no son tan importantes en el sonido, también lo configuran y componen.

- **Conseguir los modos de vibración y con ello la curva de sonido que genera el parche en cuestión**

Tras este trabajo se conoce exactamente qué vibraciones pueden dar el parche, y además, hemos obtenido el espectro de sonido del parche puesto a estudio.

- **Usar dos métodos de resolución para corroborar la solución.**

Uno de los apartados más importantes del presente estudio es el de la contrastación de resultados, en el que no solo hemos conocido qué frecuencias se excitan sino que también la importancia que tienen gracias a conocer su amplitud en relación con el resto de armónicos.

- **Identificar las variables de las que depende la curva de sonido**

En el proceso de variación de datos, hemos identificado cómo el espesor o la fuerza de golpeo apenas varían el sonido que emite el parche. Sin embargo, otras

variables como las dimensiones o la ubicación de golpeo pueden cambiar de nota el sonido del parche, e incluso de los armónicos que suenan.

- **Entender la relación que existe entre la curva de sonido y las variables de las que depende el parche**

Al crear las tablas de datos en Excel, hemos podido analizar todas las relaciones importantes. A partir de este trabajo se puede saber qué tensión habría que aplicar al parche para obtener una nota determinada. Esta misma lógica se puede aplicar para otras variables como el radio del parche. Lo que resulta más interesante, es que hayamos sido capaces de obtener las funciones que relacionan el sonido con estas variables, de tal manera que estos cálculos se podrían usar en la configuración de cualquier batería o grupo de percusión, antes incluso de fabricar dicho conjunto de instrumentos.

De igual manera sabemos cómo varía el sonido en función del material. También podemos conocer cómo cambian los armónicos en función de la localización del golpeo dentro del parche. Así, podemos conocer los efectos de aplicar la fuerza justo en el centro o desplazado de una manera completamente científica.

- **Servir como herramienta para probar la utilidad de ciertas modificaciones o elementos que se puedan aplicar al parche.**

La existencia de este tipo de elementos usados por gran parte de los percusionistas, hace muy interesante su estudio, para entender claramente lo que está ocurriendo. Con este estudio se conocen exactamente sus efectos. Para el caso de los moongel, hemos analizado cómo influencia la masa del elemento y la ubicación del mismo para concluir que la ubicación es crucial en el uso de estos elementos.

En general, hemos conseguido los resultados deseados desde el comienzo, hemos obtenido las relaciones que existen dentro del sistema entre el sonido y las características que componen dicho sistema.

Este apartado intenta explicar el gran interés que puede constituir este trabajo como herramienta para futuros trabajos. Al ser un análisis científico, por sí mismo no diseña e intenta ejecutar ningún proyecto, pero sí servir para la constitución de nuevos productos como herramienta esencial en diseño de los mismos. A continuación se

presentarán posibles aplicaciones, diseños, productos o proyectos; en cuyo diseño se podría usar este estudio como herramienta.

Una posible aplicación sería una caja con galgas extensiométricas capaz de afinarse automáticamente en función de la deformación que tiene el parche. Ya existen mecanismos basados en afinadores, y en tensar o destensar de manera automática a partir de la información que nos otorga el afinador. Sin embargo, en una caja, al tener 6 puntos de afinación para el mismo parche, si se basase la afinación en la deformación del parche, nos aseguraríamos de una afinación uniforme y constante, es decir, nos aseguraríamos, además de producir la nota deseada, de que el parche está tensado de igual manera en todo su contorno, y así evitaríamos perturbaciones y estrías en el parche, indeseables para el sonido.

De manera más sencilla, se podría ampliar el estudio para saber qué efecto tienen los herrajes de cada caja, para que los fabricantes puedan generar indicaciones acerca de cuánto ha de tensarse el parche para conseguir una nota u otra. Así, se podría indicar el número de vueltas que se necesitan girar los tornillos de los herrajes para conseguir una nota u otra.

Otra utilidad que le podría dar la industria sería su uso como prueba para nuevos posibles materiales a partir de las propiedades mecánicas del mismo. Así, cualquier tipo de piel de animal o nuevo material sintético podría ser estudiado a nivel acústico con este trabajo.



## 9. Bibliografía

- [1] Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid, 2015. Introducción al Método de los elementos Finitos. Apuntes de la asignatura Diseño Industrial.
- [2] Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad Carlos III de Madrid, *JAC Revisión 2011*. Acústica Industrial. Apuntes de la asignatura Diseño Industrial.
- [3] Colaboradores de Wikipedia, 17 de mayo del 2016. Armónico. Wikipedia. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arm%C3%B3nico>
- [4] Pérez, Lia. Los armónicos. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos59/los-armonicos/los-armonicos.shtml>
- [5] Pereira, José A. Disponible en: <http://web.archive.org/web/20091207113738/http://www.ispmusica.com/articulo.asp?id=181>
- [6] Santos, Ricky. Disponible en: <http://rickysantosbateria.blogspot.com.es/>
- [7] Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Carlos III de Madrid, 2015. Capítulo 4. Método de resolución de las ecuaciones de la elasticidad, Tema 9. Métodos de resolución (II). Apuntes de la asignatura de Elasticidad.
- [8] Sinais, Ingeniería de Mantenimiento. Disponible en: [http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/transformada\\_fourier.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/fundamentos/transformada_fourier.html)
- [9] Colaboradores de Wikipedia, 2 de junio del 2016. Frecuencia de muestreo. Wikipedia. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Frecuencia\\_de\\_muestreo&oldid=91452360](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Frecuencia_de_muestreo&oldid=91452360)
- [10] Salvia, Adriana, 2002. Método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD). Disponible en: <http://www.fing.edu.uy/inco/cursos/numerico/ed/final/FDTD.pdf>
- [11] Bilbao, Stefan. Enero 2012. Time domain simulation and sound synthesis for the snare drum *Acoustical Society of America*, Vol 131, No. 1, Pt. 2
- [12] Vasileios Chatziioannou, Maarten van Walstijn, Diciembre 2014. Energy conserving schemes for the simulation of musical *Journal of Sound and Vibration, Elsevier*.
- [13] Merino de la Fuente, Jesus Mariano, 2006. *Las vibraciones de la música* Editorial Club Universitario.

## 10. Anexos

Pretensión del parche en mm	Medición tomada	Frecuencia Fundamental	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
0,5	Frecuencia:	226	501	776	1051	1326	1576
	Amplitud:	0,1972	0,101	0,02287	0,02038	0,00746	0,01254
0,7	Frecuencia:	251	576	901	1226	1551	Amplitud casi nula
	Amplitud:	0,231	0,06335	0,02344	0,00931	0,00878	

Anexo 1: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación de la pretensión

Instrumento	Radio en milímetros	Frecuencia Fundamental	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
Tom1	127	352,80	807,66	1260,5	1706,6	2143,4	2567,5
Tom2 y caja	152	269,67	617,38	964,08	1305,4	1639,8	1963,2
Caja	177	214,81	492,51	770,54	1047,00	1320,90	1591,50
Caja	190	193,15	442,57	691,65	938,29	1181,00	1419,20
Bombo	200	178,89	409,98	640,96	870,32	1096,60	1318,80
Bombo	228	147,03	337,07	527,21	716,26	903,43	1087,90
Bombo	254	125,09	286,83	448,86	610,14	770,13	928,43
Bombo	280	108,11	247,93	388,12	527,76	666,47	804,01

Anexo 2: Tabla de datos de los modos armónicos en función del radio del parche

Radio del parche medido en mm	Medición tomada	Frecuencia Fundamental	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
Radio 127 (timbal)	Frecuencia:	351	801	1251	1701	2126	2526
	Amplitud:	0,2525	0,03312	0,01174	0,00789	0,00176	0,00277
Radio 177 (caja)	Frecuencia:	226	501	776	1051	1326	1576
	Amplitud:	0,1972	0,101	0,02287	0,02038	0,00746	0,01254

Anexo 3: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación del radio del parche

Material empleado en parche	Medición tomada	Frecuencia Fundamental	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
Kevlar	Frecuencia:	201	476	751	1026	1276	1551
	Amplitud:	0,2387	0,1296	0,02796	0,02387	0,00736	0,00995
Mylar	Frecuencia:	226	501	776	1051	1326	1576
	Amplitud:	0,1972	0,101	0,02287	0,02038	0,00746	0,01254

Anexo 4: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación del material

Desplazamiento del centro en milímetros	Medición tomada	Frecuencia Fundamental	Arm. 1/2	Arm. 1	Arm. 3/2	Arm. 2	Arm. 5/2
00 mm	Frecuencia:	221		501		761	
	Amplitud:	0,3078		0,1129		0,02822	
15 mm	Frecuencia:	221		501		761	
	Amplitud:	0,3247		0,1147		0,02457	
30 mm	Frecuencia:	221,4		501,8	622	762,2	902,4
	Amplitud:	0,2974		0,08728	0,00626	0,01515	0,00547
45 mm	Frecuencia:	221,7		502,6	623	763,4	903,9
	Amplitud:	0,2874		0,06053	0,00847	0,00331	0,00419
60 mm	Frecuencia:	221,1	362,7	483,3	624	764,7	905,3
	Amplitud:	0,2564	0,00657	0,03489	0,0077	0,0079	0,00104
90 mm	Frecuencia:	223,1	344,3	485,7	627	768,4	909,7
	Amplitud:	0,1896	0,01363	0,02451	0,00192	0,01259	0,00238
120 mm	Frecuencia:	224	345,7	487,6	629,5	771,5	
	Amplitud:	0,119	0,01193	0,05901	0,00451	0,00328	

Anexo 5: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación de la ubicación del golpeo

Desplazamiento del centro en milímetros	Medición tomada	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 9/2	Arm. 5
00 mm	Frecuencia:	1041	1321		1581
	Amplitud:	0,03033	0,00945		0,01135
15 mm	Frecuencia:	1041	1321		1581
	Amplitud:	0,02418	0,006861		0,005759
30 mm	Frecuencia:	1043	1183	1443	1584
	Amplitud:	0,007804	0,002021	0,001725	0,001098
45 mm	Frecuencia:	1044	1205	1305	1566
	Amplitud:	0,006437	0,000418	0,003397	0,002435
60 mm	Frecuencia:	1046	1167	1428	1569
	Amplitud:	0,01062	0,001109	0,001214	0,00109
90 mm	Frecuencia:	1051	1314	1435	1576
	Amplitud:	0,00332	0,002636	0,001428	0,001017
120 mm	Frecuencia:	1035	1319	1441	1562
	Amplitud:	0,003504	0,002209	0,00114	0,001111

Anexo 5: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación de la ubicación del golpeo

Presión usada en el golpeo medida en Pa	Medición tomada	Frecuencia Fundamental	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
10	Frecuencia:	211	491	771	1031	1301	1551
	Amplitud:	0,1047	0,06697	0,01033	0,01021	0,00341	0,00357
25	Frecuencia:	211	491	771	1041	1301	1561
	Amplitud:	0,2611	0,166	0,02901	0,02356	0,01127	0,0095
50	Frecuencia:	211	491	771	1041	1311	1571
	Amplitud:	0,5189	0,3207	0,06897	0,05725	0,02433	0,0181

Anexo 6: Tabla de datos del espectro de sonido para la variación de la presión del golpeo

Equipamiento del aro	Medición tomada	Frecuencia Fundamental	Arm. 1	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 5
Con aro	Frecuencia:	221	501	751	1011	1291	1571
	Amplitud:	0,6379	0,2367	0,06266	0,06309	0,0235	0,01898
Sin aro	Frecuencia:	211	491	771	1041	1311	1571
	Amplitud:	0,5189	0,3207	0,06897	0,05725	0,02433	0,0181

Anexo 7: Tabla de datos del espectro de sonido para el equipamiento del aro

Distancia del centro en mm y masa en gr	Medición tomada	Frec. Fund.	Arm. 1/2	Arm. 1	Arm. 3/2	Arm. 2	Arm. 3	Arm. 4	Arm. 9/2	Arm. 5
Sin moongel	Frecuencia:	221		501		761	1041	1321		1581
	Amplitud:	0,3078		0,1129		0,0282	0,0303	0,0095		0,0114
A distancia de 125 con masa de 50 gr	Frecuencia:	221		521		781	1041	1301		1561
	Amplitud:	0,3586		0,0786		0,0194	0,0324	0,0055		0,0104
A distancia de 125 con masa de 20 gr	Frecuencia:	221	461	521		781	1041	1301	1321	1561
	Amplitud:	0,3464	0,0341	0,08		0,0195	0,0329	0,0051	0,0053	0,0107
A distancia de 150 con masa de 50 gr	Frecuencia:	221		501		781	1041	1301		1561
	Amplitud:	0,3491		0,1441		0,0288	0,0191	0,0086		0,0138
A distancia de 150 con masa de 20 gr	Frecuencia:	221		501	641	781	1041	1301		1561
	Amplitud:	0,3387		0,1224	0,004	0,0211	0,0276	0,0094		0,012

Anexo 8: Tabla de datos del espectro de sonido para el elemento moongel

## 11. Índice de Imágenes

*Imagen 1: Rango audible*

*Imagen 2: Ondas sonoras de una frecuencia fundamental y sus armónicos sobre el dominio del tiempo*

*Imagen 3: Bordonera de una caja*

*Imagen 4: Parches de una batería*

*Imagen 5: Caja estándar*

*Imagen 6: Baquetas estándar*

*Imagen 7: Aros quita-armónicos*

*Imagen 8: Otros elementos quita armónicos*

*Imagen 9: Moongel estándar*

*Imagen 10: Discretización de un volumen*

*Imagen 11: División de los elementos de un sistema*

*Imagen 12: Procesado FFT de una onda vibratoria compleja*

*Imagen 13: Constitución de una vibración compuesta a partir de varias simples*

*Imagen 14: Modos de vibración del parche según el trabajo de Stefan Bilbao*

*Imagen 15: Modos de vibración de la bordonera según el trabajo de Stefan Bilbao*

*Imagen 16: Vibración de una cuerda de guitarra*

*Imagen 17: Vibraciones del parche según el libro de Jesus M. Merino*

*Imagen 18: Caja escogida como modelo de partida*

*Imagen 19: Parche escogido como modelo de partida*

*Imagen 20: Vista del parche simulado en Abaqus*

*Imagen 21: Parche sometido a los esfuerzos de pretensión*

*Imagen 22: Detalle de los esfuerzos de pretensión del parche*

*Imagen 23: Mallado del parche*

*Imagen 24: Perturbación del análisis del parche*

*Imagen 25: Vista del aro quita armónicos simulado en el Abaqus*

*Imagen 27: Vista del parche para el modelo usado para los moongel*

*Imagen 28: Vistas de la vibración de la frecuencia fundamental con y sin activar la opción Nlgeon en Abaqus*

*Imagen 30: Vista de la onda de un solo golpeo en Pro Tools*

*Imagen 31: Vibración correspondiente a la frecuencia fundamental del parche*

*Imagen 32: Vista del parche creado para el modelo de las variaciones de la ubicación del golpeo*

*Imagen 33: Nuevas vibraciones al golpear el parche desplazado del centro*

## 12. Índice de Tablas

*Tabla 1: Relación entre las frecuencias y las notas del piano*

*Tabla 2: Relación de dB con Pa, su intensidad y fuente, de diferentes sonidos*

*Tabla 3: Unidades de medida escogidas para la simulación*

*Tabla 4: Datos del parche usado como modelo*

*Tabla 5: Datos iniciales del aro quita armónicos*

*Tabla 6: Desarrollo de los datos de la gráfica espacio temporal, a lo largo de los programas usados hasta introducirlos en Matlab*

*Tabla 7: Desarrollo de la FFT en Matlab*

*Tabla 8: Vista de la gráfica espacio temporal de partida y del espectro de sonido que se obtiene de ella*

*Tabla 9: Datos iniciales del análisis*

*Tabla 10: Propiedades mecánicas del Kevlar*

*Tabla 11: Variaciones realizadas del radio del parche*

*Tabla 12: Variaciones realizadas de la pretensión del parche*

*Tabla 13: Variaciones realizadas del desplazamiento del centro del golpeo*

*Tabla 14: Modos de frecuencia no axilsimétricos*

*Tabla 15: Modos de frecuencia axilsimétricos*

*Tabla 16: Frecuencias excitadas tras el golpeo*

*Tabla 17: Resultados del primer método de las variaciones del radio del parche*

*Tabla 18: Dominio del tiempo y de la frecuencia para una pretensión de 0'3 mm*

*Tabla 19: Dominio del tiempo y de la frecuencia para una pretensión de 0'7 mm*

*Tabla 20: Vistas de las nuevas vibraciones del parche con los moongel colocados*

## 13. Índice de Gráficas

*Gráfica 1: Curvas isofónicas*

*Gráfica 2: Muestreo de una señal*

*Gráfica 3: Vibraciones de una cuerda de guitarra*

*Gráfica 4: Golpeo de la baqueta*

*Gráfica 5: Pretensión del parche*

*Gráfica 6: Desplazamiento sobre el tiempo del punto céntrico del parche sometido a estudio en el segundo método*

*Gráfica 7: Primera vista de la FFT reportada por Matlab*

*Gráfica 8: Segunda vista de la FFT reportada por Matlab, fftshift*

*Gráfica 9: Curvas de las frecuencias para cada variación de radio*

*Gráfica 10: Curvas de las variaciones de radio para las tres primeras frecuencias que suenan*

*Gráfica 11: Curvas de las variaciones de radio para las tres últimas frecuencias que suenan*

*Gráfica 12: Curvas de los picos de frecuencia para una pretensión de 0'5 y de 0'7 mm*

*Gráfica 13: Curvas de las variaciones de pretensión para cada frecuencia, con sus ecuaciones*

*Gráfica 14: Curvas de los picos de frecuencia para radios de 127 y 177 mm*

*Gráfica 15: Curvas de los picos de frecuencia para los materiales empleados, Kevlar y Mylar*

*Gráfica 16: Variación de la amplitud de las frecuencias fundamentales para cada variación de la ubicación de golpeo*

*Gráfica 17: Curvas de la amplitud de los picos de frecuencias para cada variación de la presión de golpeo*

*Gráfica 18: Curvas de la amplitud de los picos de frecuencias para el parche con y sin aro quita armónicos*

*Gráfica 19: Curvas de la amplitud de los picos de frecuencia para las variaciones del modelo con moongel*



## 14. Índice de Espectros de sonido

*Espectro de sonido 1: Ejemplo de onda de una canción sin cuerpo*

*Espectro de sonido 2: Ejemplo de onda de una canción con cuerpo*

*Espectro de sonido 3: Variaciones de la ubicación del golpeo y momentos según el libro de Jesus M. Merino*

*Espectro de sonido 4: Golpeo estándar sobre el parche*

*Espectro de sonido 5: Radio de 127 mm*

*Espectro de sonido 6: Parche de Kevlar*

*Espectro de sonido 7: Golpeo sin desplazamiento*

*Espectro de sonido 8: Golpeo con desplazamiento de 15 mm*

*Espectro de sonido 9: Golpeo con desplazamiento de 30 mm*

*Espectro de sonido 10: Golpeo con desplazamiento de 45 mm*

*Espectro de sonido 11: Golpeo con desplazamiento de 60 mm*

*Espectro de sonido 12: Golpeo con desplazamiento de 90 mm*

*Espectro de sonido 13: Golpeo con desplazamiento de 120 mm*

*Espectro de sonido 14: Parche con moongel de 20 gr a 125 mm del centro*

*Espectro de sonido 15: Parche con moongel de 20 gr a 125 mm del centro*